

**UNIVERSIDAD DE CUENCA**



**Facultad de Ciencias Químicas  
Carrera de Ingeniería Ambiental**

**Evaluación de la factibilidad de cosechar agua lluvia en la ciudad de Cuenca,  
como método de gestión ambiental para ahorrar agua potable**

*Trabajo de titulación previo a la obtención del  
título de Ingeniero Ambiental*

**Autor:**

David Santiago Peña Cardoso  
C.I. 0104623905

**Director:**

Ing. Rolando Enrique Céleri Alvear, PhD  
C.I.0602794406

**Cuenca – Ecuador**

**26/06/2019**

## Resumen

Cuenca se caracteriza por poseer un buen sistema de abastecimiento de agua potable. La geografía de la zona y la gestión de entidades municipales permiten que el servicio sea económico y de fácil acceso. Sin embargo, la dotación de agua potable se ve amenazada por el alto consumo per cápita, puesto que se ha estimado escasez de dicho recurso para el año 2050. Por lo cual es necesario plantear alternativas que permitan la optimización del recurso. De tal forma, esta investigación evalúa un sistema de almacenamiento o cosecha de agua lluvia, en los tejados de las viviendas de la ciudad de Cuenca, por medio del análisis diario del almacenamiento de agua lluvia, en función de: las precipitaciones de la ciudad, el área de captación, las pérdidas por escorrentía en el tejado, la efectividad del sistema de captación, la demanda de agua lluvia en el hogar y el tamaño del tanque de almacenamiento. La evaluación del sistema de cosecha de agua lluvia se basa en distintos índices que facilitan al usuario la toma de decisiones de acuerdo a sus requerimientos y circunstancias. Se generaron distintos escenarios de captación y uso de agua lluvia, considerando las realidades de los hogares. Los resultados indican que la cosecha de agua lluvia permite reducir el consumo de agua potable en hasta un 18,45 % en aquellas actividades que no requieren el uso de la misma, como en las descargas en los inodoros y limpieza del hogar, además del ahorro económico asociado. Adicionalmente, la cosecha de agua lluvia se presenta como una estrategia de gestión ambiental, debido a que esta actividad prolongaría el tiempo que las fuentes hidrológicas de la ciudad sean capaces abastecer a los pobladores.

**Palabras clave:** Agua potable. Cosecha de agua lluvia. Gestión ambiental.

**Abstract**

Cuenca is characterized by having a good system of drinking water supply. The geography of the area and the good management practices of the water utility allow the service to be affordable and easily accessible. However, the drinking water supply is threatened by the high demand per capita; therefore, it has been estimated that a shortage of this resource will happen by the year 2050. Therefore, it is necessary to propose alternatives that allow the optimization of the resource. In this way, this research evaluates rainwater storage or harvesting system, on the roofs of houses in the city of Cuenca through daily analysis of rainwater storage, based on: rainfall in the city; the catchment area, run-off losses, the effectiveness of the system, the demand for rainwater in the home, and the size of the storage tank. The evaluation of the rainwater harvesting system was based on different indices that make it easier for the user to make decisions according to their requirements and circumstances. Different scenarios of catchment and use of rainwater were generated, considering the realities of households. Results show that rainwater harvesting can reduce the consumption of potable water up to an 18.45 %, in those activities that do not require the use of it, such as flushing in toilets and cleaning the home, in addition to the associated financial savings. Additionally, the rainwater harvesting is presented as an environmental management strategy, because this activity would prolong the life time that the hydrological sources of the city are able to supply the inhabitants.

**Keywords:** Drinking water. Rainwater harvesting. Environmental management.



---

## Contenido

<b>Resumen .....</b>	<b>2</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Introducción .....</b>	<b>10</b>
<b>2. Materiales y métodos .....</b>	<b>14</b>
2.1 Área de estudio .....	14
2.2 Conceptualización del sistema de cosecha de agua lluvia en techos para un hogar y desarrollo de un modelo de balance de agua .....	15
2.3 Base de datos de precipitación.....	16
2.4 Escenarios de captación y uso de agua lluvia, determinación de las constantes del sistema hidrológico, con base en la realidad de los hogares de la ciudad .....	17
2.5 Evaluación del sistema de cosecha de agua lluvia .....	17
1. Ahorro de agua potable y eficiencia de satisfacción de la demanda: .....	18
2. Dinámica del almacenamiento: .....	18
3. Días al mes con el tanque vacío .....	19
4. Días al mes que no se cumple la demanda .....	19
5. Eficiencia promedio mensual .....	19
<b>3. Resultados .....</b>	<b>20</b>
3.1 Conceptualización del sistema de cosecha de agua lluvia en techos para un hogar.....	20
3.2 Desarrollo de un modelo de balance de agua .....	21
3.3 Construcción de la base de datos de precipitación .....	22
3.3.1 Análisis de pluviógrafos existentes y selección del sitio de estudio .....	22
3.3.2 Base de datos de precipitación. ....	24
3.4 Generar escenarios de captación, uso de agua lluvia con base en la realidad de los hogares de la ciudad y definir las constantes del sistema hidrológico .....	25
3.4.1. Escenarios .....	25
3.4.2. Constantes del sistema hidrológico .....	26
3.5 Evaluación del funcionamiento del sistema de cosecha de agua lluvia. ....	27
3.5.1 Ahorro de agua potable y eficiencia de satisfacción de la demanda.....	27
3.5.2 Dinámica del almacenamiento .....	28
3.5.3 Días al mes con el tanque vacío .....	30
3.5.4 Días al mes que no se cumple la demanda.....	31
3.5.5 Eficiencia promedio mensual .....	33



3.6 Interpretación de los resultados de la evaluación del funcionamiento del sistema de cosecha de agua lluvia .....	34
<b>4. Conclusiones .....</b>	<b>37</b>
<b>5. Estudios futuros .....</b>	<b>38</b>
<b>6. Bibliografía .....</b>	<b>39</b>
<b>7. Anexos .....</b>	<b>41</b>



## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Diagrama de la metodología. ....	14
<b>Figura 2.</b> Conceptualización del sistema de cosecha de agua lluvia. ....	20
<b>Figura 3.</b> Modelo de balance del almacenamiento y desperdicio de agua lluvia.....	21
<b>Figura 4.</b> Existencia inicial de datos en los distintos pluviógrafos analizados. ....	23
<b>Figura 5.</b> A) Correlación CVB-EB y B) Correlación CVB-ZM. ....	23
<b>Figura 6.</b> Precipitación diaria. ....	24
<b>Figura 7.</b> Precipitación mensual. ....	25
<b>Figura 8.</b> A) Ahorro de agua potable y (B) eficiencia de satisfacción de la demanda, expresado en porcentaje para los tres tanques de almacenamiento y las tres áreas de captación. ....	28
<b>Figura 9.</b> Dinámica del almacenamiento de los tanques de almacenamiento A) 60 m <sup>2</sup> , B) 80 m <sup>2</sup> y C) 100 m <sup>2</sup> . ....	30
<b>Figura 10.</b> Días al mes que el tanque queda vacío a: A) 60 m <sup>2</sup> , B) 80 m <sup>2</sup> y C) 100 m <sup>2</sup> de captación. ....	31
<b>Figura 11.</b> Días al mes que no se cubre el 100% de la demanda a: A) 60 m <sup>2</sup> , B) 80 m <sup>2</sup> y C) 100 m <sup>2</sup> de captación.....	32
<b>Figura 12.</b> Eficiencia promedio mensual a A) 60 m <sup>2</sup> , B) 80 m <sup>2</sup> y C) 100 m <sup>2</sup> de captación. ....	34

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Datos de entrada y salida del modelo. ....	16
<b>Tabla 2.</b> Índices de eficiencia del sistema.....	18
<b>Tabla 3.</b> Pluviógrafos analizados para escoger el sitio de estudio. ....	22



### Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

David Santiago Peña Cardoso en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Evaluación de la factibilidad de cosechar agua lluvia en la ciudad de Cuenca, como método de gestión ambiental para ahorrar agua potable", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 27 de junio de 2019

David Santiago Peña Cardoso

C.I: 0104623905



### Cláusula de Propiedad Intelectual

David Santiago Peña Cardoso, autor del trabajo de titulación "Evaluación de la factibilidad de cosechar agua lluvia en la ciudad de Cuenca, como método de gestión ambiental para ahorrar agua potable", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 27 de junio de 2019

David Santiago Peña Cardoso

C.I: 0104623905





## AGRADECIMIENTOS

Agradezco de manera especial al Ing. Rolando Céleri Alvear, PhD por su guía y enseñanza, quien con su gran conocimiento colaboró para el desarrollo de este trabajo de titulación.

De la misma manera al Ing. Adrian Sucozhañai, Msc. por su apoyo, paciencia y aporte de conocimientos para la realización de esta investigación.

Al Ing. Juan Pesántez, Msc. por su apoyo incondicional y sus conocimientos impartidos para la mejora de esta investigación.

Al Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca, quienes me han facilitado la información y ayuda necesaria para el desarrollo de esta investigación.

**David**

## 1. Introducción

La calidad y cantidad de agua potable que llega a una población es la base para la conservación de su bienestar. Cada habitante tiene derecho de acceder a este recurso, para satisfacer sus necesidades diarias (Aladenola & Adeboye, 2010). Sin embargo, la mala distribución de la riqueza y el alto índice de crecimiento demográfico obstaculizan el acceso global a este derecho. El uso del agua potable en diversas actividades antrópicas, que no requieren estas características específicas, ha generado una sobreexplotación de las fuentes hídricas, sobrevaloración del agua potable y la reducción total o parcial de la disponibilidad en diferentes zonas a nivel mundial.

Los Ecosistemas Andinos proveen servicios ecosistémicos como el aprovisionamiento de agua. El líquido vital, que abunda en estos ecosistemas, drena hacia las partes medias y bajas de las cuencas, donde se ubica gran parte de la población de los países andinos. Sin embargo, la demanda de agua genera presión en estos ecosistemas, reduciendo su capacidad de regulación y abastecimiento (Tobón, 2009).

A la vez, existe déficit y exceso de agua en ciertos lugares del planeta. A nivel global, la precipitación anual sobre el suelo es de 814 mm o casi 110000 km<sup>3</sup>, de los cuales el 56 % se pierde a través de la evapotranspiración por acción de las masas vegetales, 5 % por la agricultura y el 39 % restante forma parte de los recursos anuales renovables de agua dulce (aguas superficiales y subterráneas) disponibles a nivel mundial para uso humano y para el ambiente. En el año 2014 se estableció un gasto de 16000 litros por persona al día, es decir, 5800 m<sup>3</sup> por persona al año. Desafortunadamente la distribución geográfica del recurso hídrico es desigual y de difícil acceso; además de las diferencias espaciales, existen diferencias temporales, por lo que no llueve en el mismo periodo ni con la misma intensidad alrededor del mundo (FAO, 2016).

De acuerdo a información proporcionada por ETAPA - EP (2019), la ciudad de Cuenca posee un consumo excesivo de agua potable. El exceso se evidencia debido a que el año 2017 se registró un consumo promedio de 194.27 litros por persona al día, mientras que la Organización Mundial de la Salud (OMS) afirma que, con 100 litros por persona al día, es posible satisfacer todas sus necesidades de higiene y consumo (Howard & Bartram, 2003). Es decir que en la ciudad de Cuenca se consume casi el doble de agua potable de acuerdo a lo recomendado por la OMS. Una de las razones estaría relacionada al empleo del recurso para actividades que no requieren el uso de agua potabilizada, lo cual se complementa con el hecho de que la tarifa del agua

---

potable en la ciudad es relativamente baja, a causa de la alta disponibilidad y accesibilidad del recurso, adicionalmente al subsidio brindado por la empresa ETAPA.

En la ciudad de Cuenca, el costo por la potabilización de 1 m<sup>3</sup> de agua es de \$ 1.29. Un hogar promedio, con cuatro miembros, consume 23.3 m<sup>3</sup> al mes, por lo que con la tarifa subsidiada pagaría \$ 17.55 por este recurso (ETAPA - EP, 2019); mientras que, en otras ciudades como Los Ángeles California, por la misma cantidad, se pagaría \$ 57.45 (California Water Service, 2019). Es importante resaltar que acorde a la OMS, un hogar con las características mencionadas, debería consumir 12 m<sup>3</sup> (Howard & Bartram, 2003). El desperdicio de agua potable en la ciudad se encuentra entre el 40 al 60 % del recurso (El Telégrafo, 2012). El desperdicio de agua potable provendría de actividades como lavado de vehículos, riego de jardinería, fugas, entre otras, que se ejecutan en los domicilios de la ciudad. En la mayoría de actividades antrópicas domésticas, el agua requerida no debe cumplir estándares estrictos amparados en la normativa ecuatoriana.

Existen dos opciones para el manejo sostenible del agua: i) encontrar nuevas alternativas para el abastecimiento, y ii) utilizar eficientemente los limitados recursos disponibles. Hasta ahora los esfuerzos se han centrado en la primera opción, mientras que la segunda alternativa ha recibido atención limitada (Rojas, Gallardo, & Martínez, 2012). Las nuevas fuentes de agua son poco accesibles, técnica y económicamente. Por ejemplo, la Ciudad de México ha recurrido a la extracción de agua subterránea profunda y el traslado del recurso a grandes distancias, que superan los 100 km (Solís M., 2009). A nivel local, la ciudad de Quito, capital del país, se ha visto en la necesidad de canalizar agua desde zonas lejanas para poder satisfacer la demanda de agua de su población (EPMAPS, s. f.)

Para hacerle frente a la desigualdad del acceso al recurso hídrico, se han generado diversos métodos, basados en la implementación de técnicas para la captación del recurso agua, de manera que pueda ser utilizado en actividades diarias del ser humano. El aprovechamiento de agua lluvia es un esfuerzo técnico, simple o complejo, para incrementar la disponibilidad de agua almacenada en el suelo o en estructuras construidas, de tal manera que pueda ser utilizada posteriormente bajo condiciones de déficit de lluvias (FAO, 2013). El agua de lluvia cosechada se puede utilizar para la agricultura de secano o para el suministro de agua en los hogares (Helmreich & Horn, 2009). Por ejemplo, en la región de O'Higgins, Chile, se implementó un proyecto para la cosecha de agua lluvia, impulsado por el Programa de Lucha Contra la

---

Desertificación de las Naciones Unidas. En el cual, se utilizaron los tejados de las casas como superficie colectora del agua lluvia, conduciéndola mediante tubos de PVC a estanques con capacidad de 5.4 a 20 m<sup>3</sup>. El proyecto resultó de gran utilidad para los habitantes del sector, sirviendo como método de gestión de sequías y ayudándoles a mejorar su calidad de vida (PNUD, 2016).

El agua lluvia es utilizada en lugares donde la sequía genera problemas para el abastecimiento de agua de las comunidades, aunque los sistemas de captación de agua de lluvia se pueden adaptar a diferentes condiciones (PNUD, 2016). El aprovechamiento no sólo puede emplearse como método de lucha contra la sequía, sino también como instrumento para hacerle frente al cambio climático en los suministros de agua, y para complementar los recursos hídricos en áreas donde el cumplimiento de la demanda es inadecuada (Aladenola & Adeboye, 2010).

Se conoce una amplia variedad de técnicas sobre captación de agua de lluvia de diferentes fuentes (precipitación, niebla, nieve), métodos y para diversos usos. Estas técnicas de captación de agua de lluvia se clasifican en tres categorías básicas: i) micro captaciones o captación dentro del sistema, ii) sistemas de captación externa, y iii) sistemas de inundación, derivación y distribución. Según el Banco Mundial, otros métodos para clasificar la captación de agua son: i) por su fuente de agua (ríos, pozos, aguas subterráneas y agua de lluvia o niebla), ii) tipo de escorrentía (por techos, dentro del campo, grandes o pequeños áreas de captación y grandes o pequeños caudales), iii) tipo de almacenamiento (tanques, cisternas y el suelo), y iv) uso principal (humano, animales, plantas, etc.) (FAO, 2000). En este estudio, la captación se clasificaría como: micro captación, con fuente de agua lluvia, escorrentía por techos de áreas de captación pequeñas, almacenamiento en tanques plásticos y uso humano no potable.

La colección de agua lluvia en la ciudad de Cuenca, serviría como un método de gestión ambiental para disminuir la demanda del recurso de la red de agua potable de ETAPA y ocupar el recurso recolectado para usos que no necesiten de agua potable. Así se podrá extender el tiempo de abastecimiento de las fuentes hídricas actuales que, según Godoy (2015), podrán satisfacer la demanda creciente únicamente hasta el 2050.

La cantidad de agua que se pueda cosechar dependerá de varios factores claves como la precipitación, la escorrentía, la efectividad, el área en la que se darán los

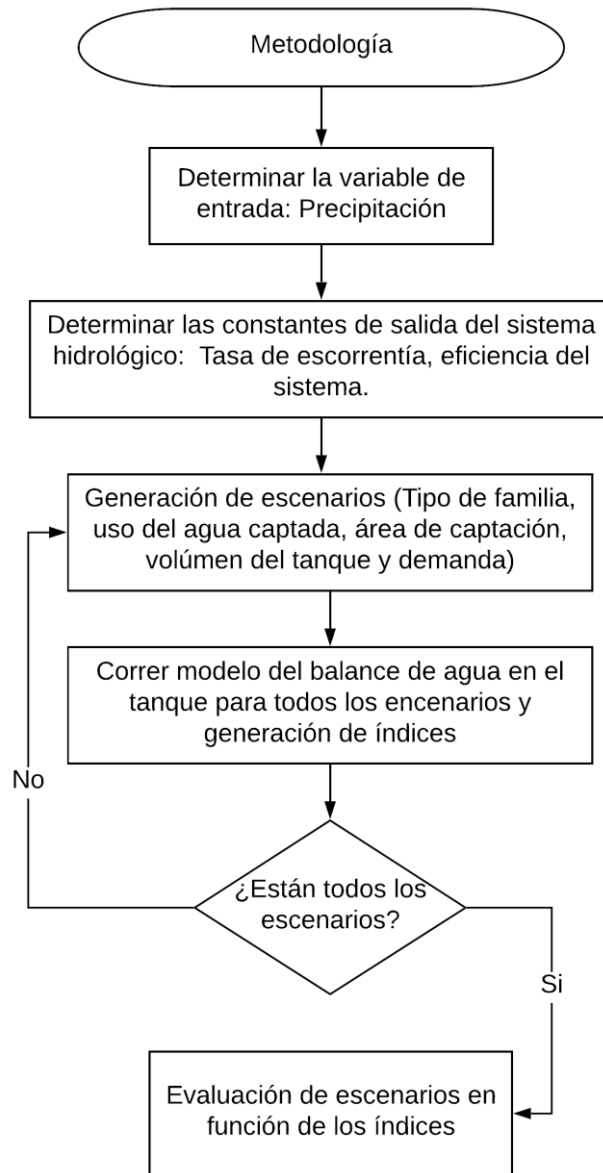
---

escurrimientos de agua de lluvia y el tanque de almacenamiento. Los cuatro últimos podrán variar acorde al objetivo de la captación y la precipitación dependerá del lugar de estudio. En relación a esto, el clima en la ciudad de Cuenca es cálido y templado. Hay precipitaciones durante todo el año, siendo su precipitación media anual aproximada de 850 mm, lo que significa que se podría coleccionar 850 litros anuales por cada  $m^2$  de captación, sin considerar ninguna pérdida.

Para contribuir a la generación de conocimiento en el tema, el objetivo de esta tesis es evaluar la factibilidad de cosechar agua lluvia en los tejados de la ciudad de Cuenca. Para ello se plantea desarrollar un modelo numérico que permita simular diariamente el almacenamiento y consumo de agua lluvia y así evaluar escenarios de cosecha de agua lluvia en función a diversos parámetros constructivos.

## 2. Materiales y métodos

La metodología seguida en este trabajo, se especifica en la Figura 1.



**Figura 1.** Diagrama de la metodología.

**Fuente:** Autor (2019)

### 2.1 Área de estudio

El estudio se realizó en la ciudad de Cuenca, al sur de la República del Ecuador, a una altura promedio de 2 550 m.s.n.m. El cantón Cuenca es uno de los más importantes del país por su economía, cultura y habitantes; situado como el tercer cantón más poblado del Ecuador. Fue declarado Patrimonio Cultural de la Humanidad por la UNESCO en 1999 por su cultura y riqueza arquitectónica. La ciudad de Cuenca está

atravesada por cuatro ríos: Tomebamba, Machángara, Tarqui y Yanuncay; lo que la convierte en una ciudad rica en recursos hídricos (Sucozhañay, 2015). Existen precipitaciones durante todo el año, ésta presenta una estructura bimodal, donde su estación con menor abundancia de lluvia ocurre entre los meses de junio y agosto; con una media anual de 850 mm (Céleri, Willems, Buytaert, & Feyen, 2007).

Para el presente estudio se escogió un punto de análisis dentro de la ciudad, el cual está ubicado en el Camino Viejo a la parroquia rural Baños, en las calles “Camino Viejo a Baños y Guacaloma”. En este sitio se instaló un pluviómetro automático marca Davis el cual registra datos con una resolución de 0.254 mm. El equipo fue instalado el 26 de marzo de 2014 y operó de manera continua hasta el cierre de la base de datos el 25 de julio de 2018.

## **2.2 Conceptualización del sistema de cosecha de agua lluvia en techos para un hogar y desarrollo de un modelo de balance de agua**

Para la conceptualización del sistema de cosecha de agua lluvia se consideraron las variables de entrada y salida; además de las constantes de pérdidas en el sistema hidrológico, que simulaban los diferentes escenarios, asemejándose a las características de los diferentes hogares. Las variables de entrada se definen como la cantidad de lluvia que llega al techo de las viviendas y que posteriormente puede ingresar al tanque de almacenamiento, mientras que las variables de salida se clasifican en dos categorías: la demanda del consumidor y el agua que se desperdicia cuando se llena el tanque de almacenamiento del sistema de cosecha. Las constantes de pérdidas en este sistema hidrológico fueron ocasionadas por la tasa de escorrentía del tejado y la eficiencia del sistema hidrológico.

Para evaluar el sistema de cosecha de agua lluvia en tejados se creó un modelo numérico que permitió cerrar el balance de agua del sistema de cosecha de agua lluvia, en forma automática. Para ello, el modelo realizó el cálculo automático del volumen acumulado en el tanque de almacenamiento o reservorio, a lo largo del tiempo y, la generación de índices que posteriormente permitieron una evaluación del sistema. Para ello se utilizó el programador R-Studio, el cual permitió realizar los diferentes cálculos, tomando en cuenta los siguientes criterios:

**Tabla 1.** Datos de entrada y salida del modelo.

Datos de entrada			Datos de Salida			
Símbolo	Nombre	Unidad	Símbolo	Nombre	Unidad	Fórmula
P	Precipitación	mm/día	Pef	Precipitación efectiva	lt	$P_{ef} = P * e * Eff * A$
E	Escorrentía	-				
A	Área de techo	m <sup>2</sup>				
Eff	Eficiencia del Sistema	-	STO	Almacenamiento de agua lluvia	lt	$STO = VI + P_{ef} - D$
VT	Volumen del tanque	lt				
VI	Volumen inicial del tanque	lt	Wasted	Desperdicio de agua lluvia	lt	$Wasted = STO - VT$
D	Demanda	lt				

Fuente: Autor (2019).

El cálculo del agua colectada se realizó considerando que 1 mm de agua caída en un evento de precipitación, corresponde a 1 lt de agua caída en 1 m<sup>2</sup> de una superficie horizontal. Se consideró un porcentaje de pérdida de agua debido a la evaporación, absorción de los techos y la salpicadura de la lluvia al momento del impacto. Estos aspectos pueden causar que la tasa de escorrentía no sea del 100 %. De igual manera, se consideró un coeficiente de efectividad del sistema; debido a que normalmente se pierde agua en las canaletas o el ingreso al tanque de almacenamiento. El modelo se programó para simular el balance hidrológico diario.

### 2.3 Base de datos de precipitación

Se estudió la cantidad exacta y la serie de tiempo de lluvia que cae en la ciudad de Cuenca, mediante pluviómetros, de marca Davis, propiedad del Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca, que cuentan con una precisión de 0.254 mm y se han ubicado en 7 puntos a lo largo de la ciudad. Sucozhañay (2015), establece que para datos de lluvia con una escala temporal superior a la diaria un solo equipo pluviométrico puede ser representativo en el área de estudio. Por esta razón, se analizó la información para determinar el punto con mayor cantidad de datos, que conjuntamente corresponda a una zona de crecimiento urbano en donde sería posible implementar el estudio propuesto. Para este análisis se creó un cronograma de datos que permitió saber en qué fechas se registraron y en qué fechas se perdieron datos. Además, se determinaron las diferentes correlaciones entre los puntos analizados, para conocer la similitud de lluvia entre ellos y así rellenar datos.



## 2.4 Escenarios de captación y uso de agua lluvia, determinación de las constantes del sistema hidrológico, con base en la realidad de los hogares de la ciudad

Se generaron distintos escenarios de captación y uso de agua lluvia, basados en las realidades más comunes de los hogares de la ciudad. Además, fue necesario determinar las constantes del sistema hidrológico. El objetivo de crear distintos escenarios le permite al usuario dimensionar el volumen comercial ideal para que su tanque de almacenamiento le permita satisfacer sus necesidades.

Escenarios:

- a) **Área de captación:** Es el área de techo de la vivienda en la cual se va a implementar el sistema de cosecha de agua lluvia. En este estudio se evaluaron 3 diferentes áreas de captación.
- b) **Demanda:** Está en función de la familia, que refleja el número de habitantes de la vivienda y del uso del agua lluvia, que es el porcentaje de agua potable que se busca remplazar con agua lluvia basado en las actividades que no la requieran. La demanda es el valor en litros que corresponde al porcentaje de agua potable que se desea remplazar con agua lluvia. En este estudio se consideró un valor constante durante todo el periodo.
- c) **Volumen del tanque de almacenamiento:** Es la capacidad máxima del tanque de almacenamiento. En este estudio se consideraron 3 tamaños comerciales de tanques.

Constantes del sistema hidrológico:

- a) **Eficiencia del sistema:** Se consideró un coeficiente de efectividad del sistema debido a que normalmente se pierde agua en las canaletas o el ingreso al tanque de almacenamiento.
- b) **Escorrentía:** Se basa en el tipo de tejado más común, debido a la pérdida de precipitación por evaporación, absorción de los techos y la salpicadura de la lluvia al momento del impacto.

## 2.5 Evaluación del sistema de cosecha de agua lluvia

Para evaluar el sistema de cosecha para cada escenario planteado en la sección anterior, se usaron los siguientes índices:

**Tabla 2.** Índices de eficiencia del sistema.

Mensuales	Generales
Días al mes con el tanque vacío (Número de días)	Ahorro de agua potable (%) y eficiencia de satisfacción de la demanda (%)
Días al mes que no se cumple la demanda (Número de días)	
Eficiencia promedio mensual (%)	Dinámica del almacenamiento

Fuente: Autor (2019).

### 1. Ahorro de agua potable y eficiencia de satisfacción de la demanda:

La eficiencia de satisfacción de la demanda (%) se calculó cada día, mediante la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} & \text{Eficiencia de satisfacción de la demanda (\%)} \\ &= \frac{\text{Volumen remanente en el tanque}}{\text{Demanda diaria}} \times 100 \end{aligned}$$

Si el tanque tiene más agua que la necesaria la eficiencia es de cien por ciento y si está totalmente seco es cero por ciento. Para el resultado general se realizó un promedio de todo el periodo.

El ahorro de agua potable (%) se calculó mediante la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} & \text{Ahorro de agua potable (\%)} \\ &= \left[ (\text{Porcentaje que representa la demanda de agua cosechada en el consumo promedio de agua potable}) \times (\text{Promedio de eficiencia de satisfacción de la demanda (\%)}) \right] \\ & \div 100 \end{aligned}$$

### 2. Dinámica del almacenamiento:

La dinámica del almacenamiento se analizó con los siguientes índices: días con el tanque de almacenamiento lleno (%), días con el tanque de almacenamiento vacío (%) y días que no cumple la demanda (%).

El porcentaje de días con el tanque lleno, se calculó mediante la siguiente expresión:

$$\text{Días con el tanque lleno (\%)} = \frac{\# \text{ Días con el almacenamiento máximo}}{\# \text{ Total de días estudiados}} \times 100$$

El porcentaje de días con el tanque vacío se calculó mediante la siguiente expresión:

$$\text{Días con el tanque vacío (\%)} = \frac{\# \text{ Días con la eficiencia de la demanda igual a 0}}{\# \text{ Total de días estudiados}} \times 100$$

El porcentaje de días que no cumple la demanda se calculó mediante la siguiente expresión:

$$\text{Días no satisfechos (\%)} = \frac{\# \text{ Días con la eficiencia menor al 100\%}}{\# \text{ Total de días estudiados}} \times 100$$

### **3. Días al mes con el tanque vacío**

Este índice permitió identificar la utilidad del sistema mes a mes. Un mes con muchos días con el tanque vacío indica que el sistema no es útil para el usuario. Por otro lado, un mes con pocos días vacío revela que el sistema tiene una alta capacidad de ser útil para el usuario. El índice se calculó mediante el conteo mensual de días en los cuales la eficiencia de satisfacción de demanda fue igual al cero por ciento.

### **4. Días al mes que no se cumple la demanda**

Este índice permite identificar mes a mes, la satisfacción completa del usuario. Un mes con pocos días de no cumplimiento quiere decir que el usuario estará totalmente servido por el sistema. Se calculó mediante el conteo mensual de días en los cuales la eficiencia de satisfacción de demanda fue menor al cien por ciento.

### **5. Eficiencia promedio mensual**

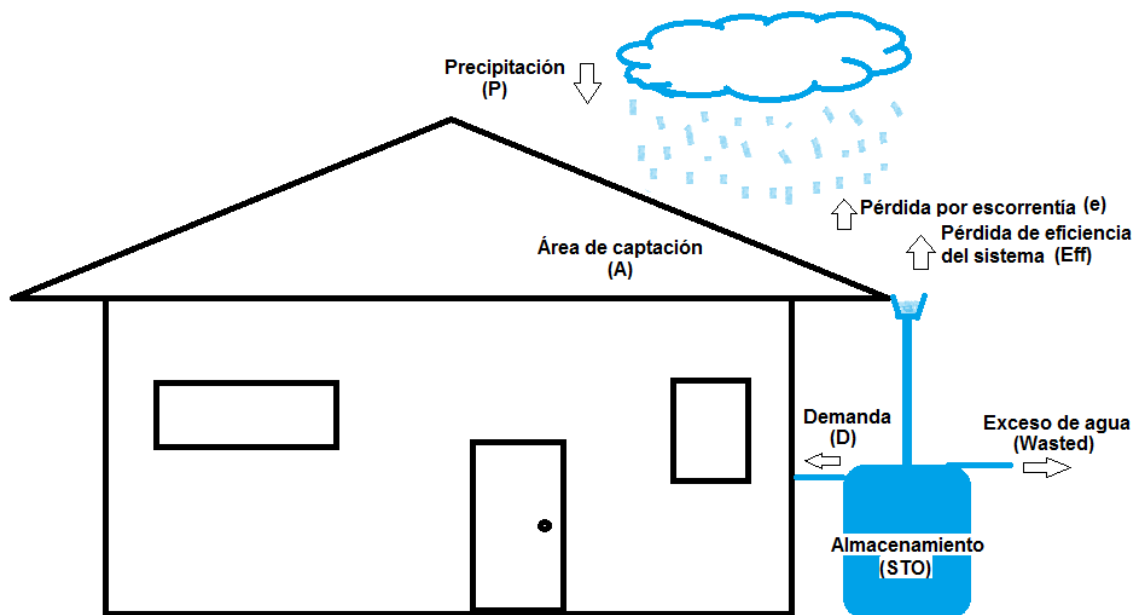
Este índice se obtuvo calculando la media aritmética mensual de la eficiencia de satisfacción de la demanda a nivel diario.

La interpretación de los resultados en distintos escenarios, le permitirá al usuario decidir (dependiendo del tamaño del techo) cuál es el tanque de almacenamiento más eficiente para satisfacer sus necesidades.

### 3. Resultados

#### 3.1 Conceptualización del sistema de cosecha de agua lluvia en techos para un hogar

El sistema de cosecha de agua lluvia, representado en la Figura 2, tuvo como variable de ingreso la precipitación diaria del punto de estudio y como variables de salida la demanda diaria de agua lluvia del hogar (dependiente del uso del agua captada) y el exceso de agua lluvia. Las constantes del sistema hidrológico fueron las pérdidas por escorrentía del tejado y por la eficiencia del sistema.



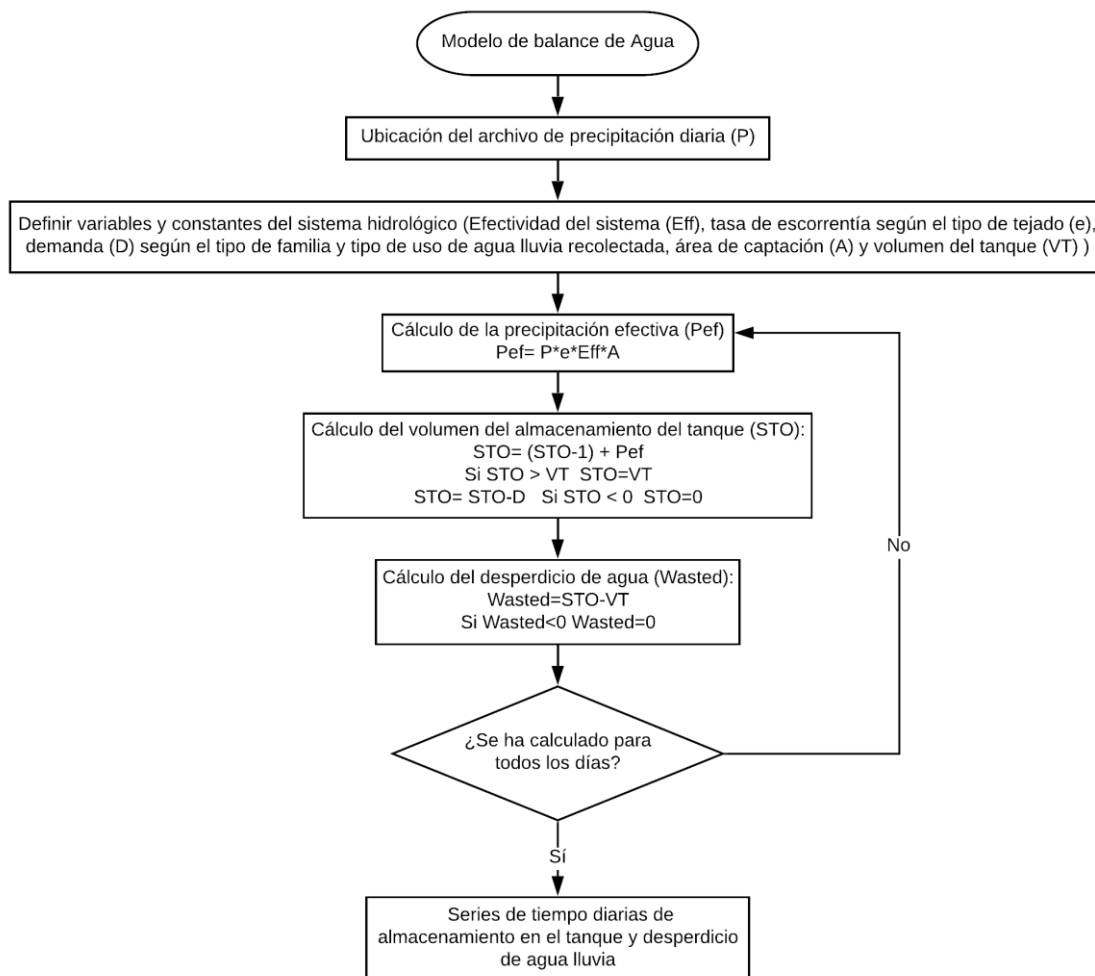
**Figura 2.** Conceptualización del sistema de cosecha de agua lluvia.

**Fuente:** Autor (2019).

La precipitación cae en el techo y es recolectada en función del área de captación, por lo que se multiplica el valor de la precipitación por el área de captación, obteniendo así el agua lluvia que cae en el techo. Debido a las pérdidas por evaporación, absorción y salpicadura en el tejado, se consideró un coeficiente de escorrentía que se multiplicó por la lluvia que cae en el techo; este valor puede ir entre 0 y 1, donde 1 significa que no existe ninguna pérdida y 0 que toda el agua se pierde. Además, se consideró la pérdida de agua lluvia en las canales y en la entrada del tanque de almacenamiento, por lo que se agregó un coeficiente de eficiencia del sistema, que varía entre 0 y 1, multiplicado por el agua recolectada por el techo. El agua que llega al tanque es almacenada conjuntamente con el agua remanente del día anterior. De toda esta agua almacenada se extrae una cantidad determinada que es el valor de la demanda del hogar. Debido a que el tanque tiene un almacenamiento finito, desde 0 hasta el

volumen del tanque, se agregaron dos consideraciones: 1) el almacenamiento no puede ser negativo, por lo que el agua que se extrae está limitada hasta cuando el tanque llegue a 0; y 2) el almacenamiento tiene un límite máximo, a partir del cual el agua no puede ingresar al tanque y es considerada como agua lluvia desperdiciada.

### 3.2 Desarrollo de un modelo de balance de agua



**Figura 3.** Modelo de balance del almacenamiento y desperdicio de agua lluvia

**Fuente:** Autor (2019).

El modelo de balance del almacenamiento y desperdicio de agua lluvia, se desarrolló en el software R-Studio, se encuentra representado como diagrama en la Figura 3. El modelo considera como archivo de ingreso el reporte de precipitación diaria del lugar de análisis. Como datos de entrada necesita el área de captación, además del volumen del tanque de almacenamiento, volumen inicial del tanque de almacenamiento, la demanda diaria, tasa de escorrentía y eficiencia del sistema. El

resultado del modelo es un archivo de Excel en el que se encuentran las series de tiempo del almacenamiento de agua lluvia y el desperdicio de la misma. A partir de este modelo se programó, en el mismo software, para que se calculen los índices para la evaluación del sistema de cosecha de agua lluvia, algunos índices generales para todo el periodo del estudio y otros mensuales (véase el script de programación en el Anexo 1).

### 3.3 Construcción de la base de datos de precipitación

La construcción de la base de datos de precipitación permitió asegurar la calidad de datos utilizados y tener una cantidad significativa de datos para el estudio realizado.

#### 3.3.1 Análisis de pluviómetros existentes y selección del sitio de estudio

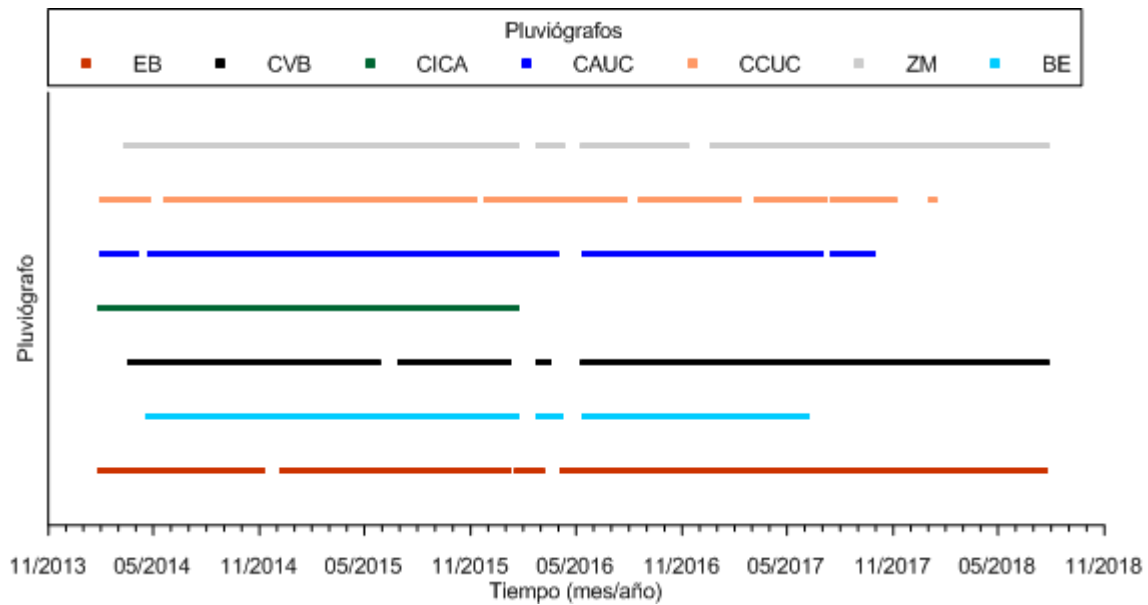
Se analizó la base de datos del Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca, el cual cuenta con 7 pluviómetros para la ciudad de Cuenca, ubicados en distintas partes, detallados en la **Tabla 3** en la que se encuentra en negrita el punto de estudio escogido.

**Tabla 3.** Pluviómetros analizados para escoger el sitio de estudio.

Código	Ubicación
ZM	Zona Militar (Rafael María Arízaga y Luís Cordero)
CCUC	Campus Central de la Universidad de Cuenca (Av.12 de abril y Agustín Cueva)
CAUC	Campus Yanuncay de la Universidad de Cuenca (Av. 12 de Octubre)
CICA	Ciudadela del Colegio de Ingenieros Civiles del Azuay (Av. Cumandá y Tabaré)
<b>CVB</b>	<b>Camino viejo a Baños (Camino Viejo a Baños y Guacaloma)</b>
EB	Entrada a Barabón (Calle SN, Frente a Cuenca Tennis y Golf Club)

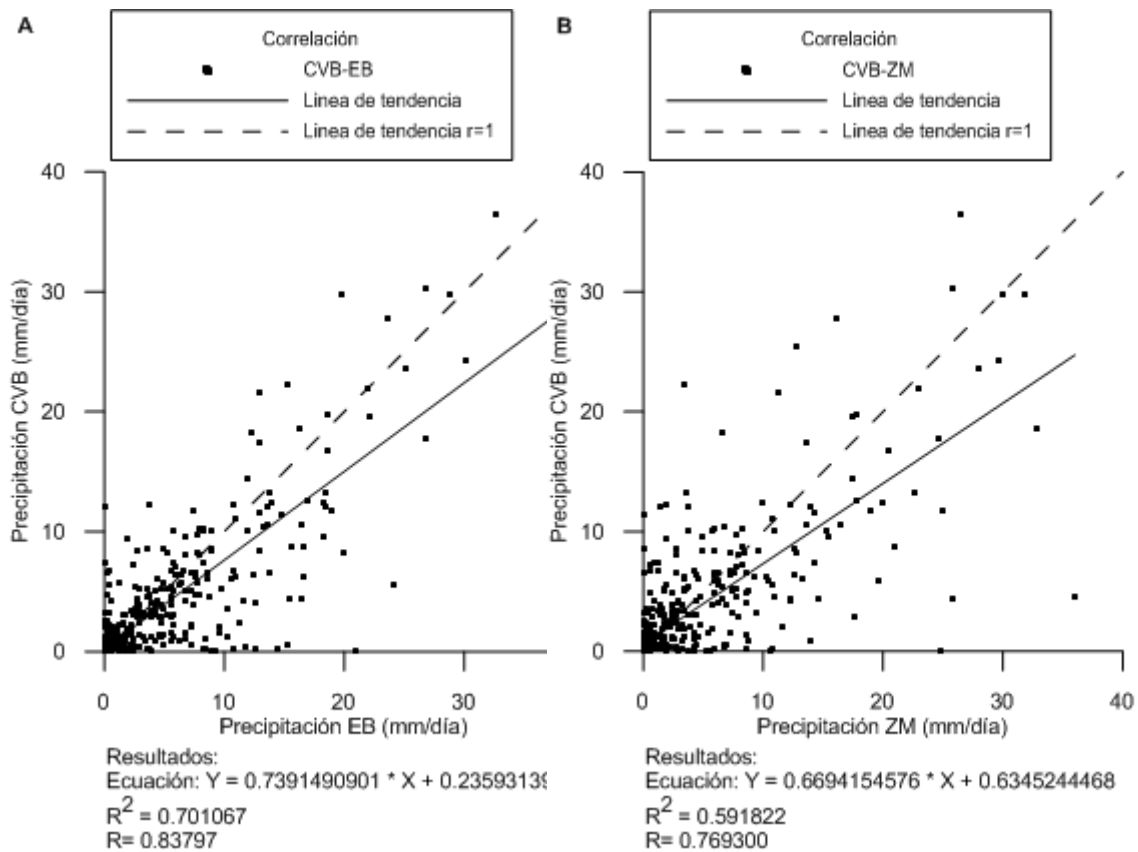
**Fuente:** Autor (2019).

Para determinar la cantidad de datos se realizó la Figura 4, en donde la mayor cantidad de datos se encontró en los puntos de estudio ZM, CVB y EB. Se escogió el punto de estudio CVB, debido a su cantidad y calidad de datos. Además, este punto resultó ideal porque está ubicado en una zona de crecimiento urbano, en la cual se construyen viviendas estándares que permitirían la aplicación de proyectos de cosecha de agua lluvia.



**Figura 4.** Existencia inicial de datos en los distintos pluviómetros analizados.

**Fuente:** Autor (2019).



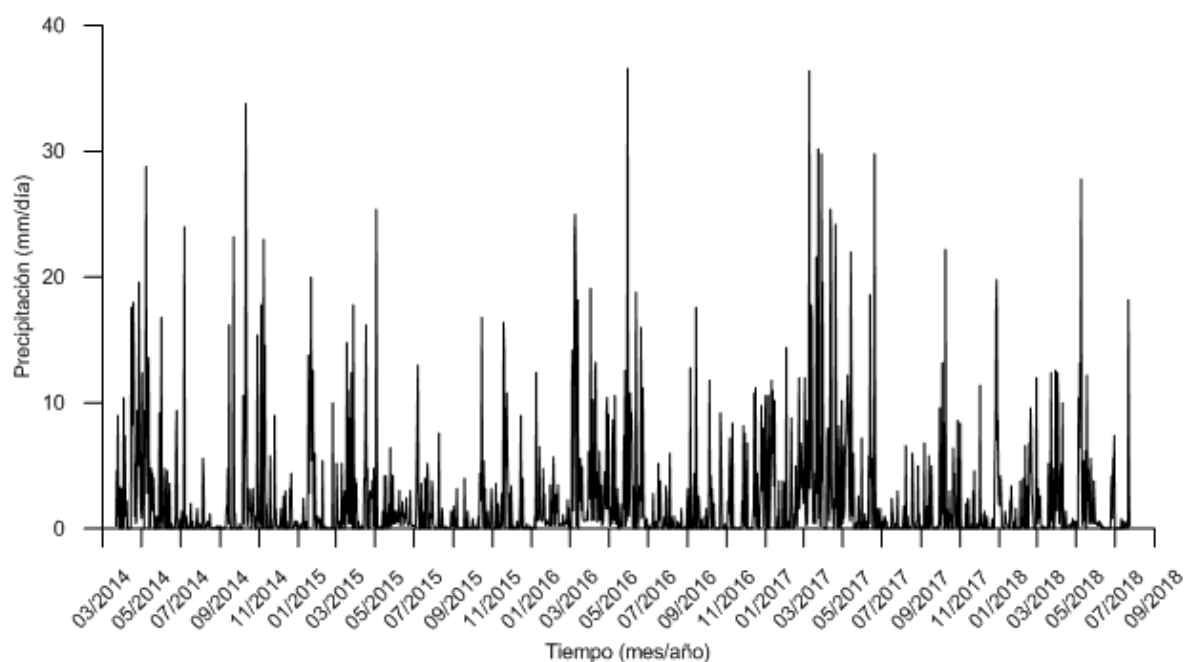
**Figura 5.** A) Correlación CVB-EB y B) Correlación CVB-ZM.

**Fuente:** Autor (2019).

Para generar una base de datos, que tenga continuidad en todo el periodo en el que se encuentra instalado el pluviógrafo en el punto de estudio CVB, se realizó un análisis de correlación con todos los pluviógrafos. El resultado indicó que la mejor correlación la tuvo con el pluviógrafo EB con  $r = 0.8373$ , seguido por ZM con  $r = 0.7693$  (se puede observar en la Figura 5), lo que significó una muy buena relación lineal con estos 2 puntos, por lo que se rellenaron todos los datos posibles con EB y en caso de existir vacíos en los 2 pluviómetros, se rellenó con ZM a partir de las ecuaciones de regresión lineal.

### 3.3.2 Base de datos de precipitación.

La base de datos de precipitación diaria, representada en la Figura 6, posee datos desde el día 26 de marzo de 2014 hasta el 25 de julio de 2018; el dato de precipitación máxima fue de 36 mm/día en los 1586 días de datos, donde se reflejaron lluvias a lo largo de todo el periodo estudiado.



**Figura 6.** Precipitación diaria.

**Fuente:** Autor (2019).

En la Figura 7 se pueden apreciar los meses más lluviosos en la ciudad de Cuenca, correspondiendo a los meses de marzo, abril, mayo, octubre y noviembre. El mes de marzo de 2017 presentó la mayor cantidad de lluvia mensual, con un valor de 258.8 mm/mes, el cual fue el valor más alto registrado con los demás pluviómetros en el periodo analizado.



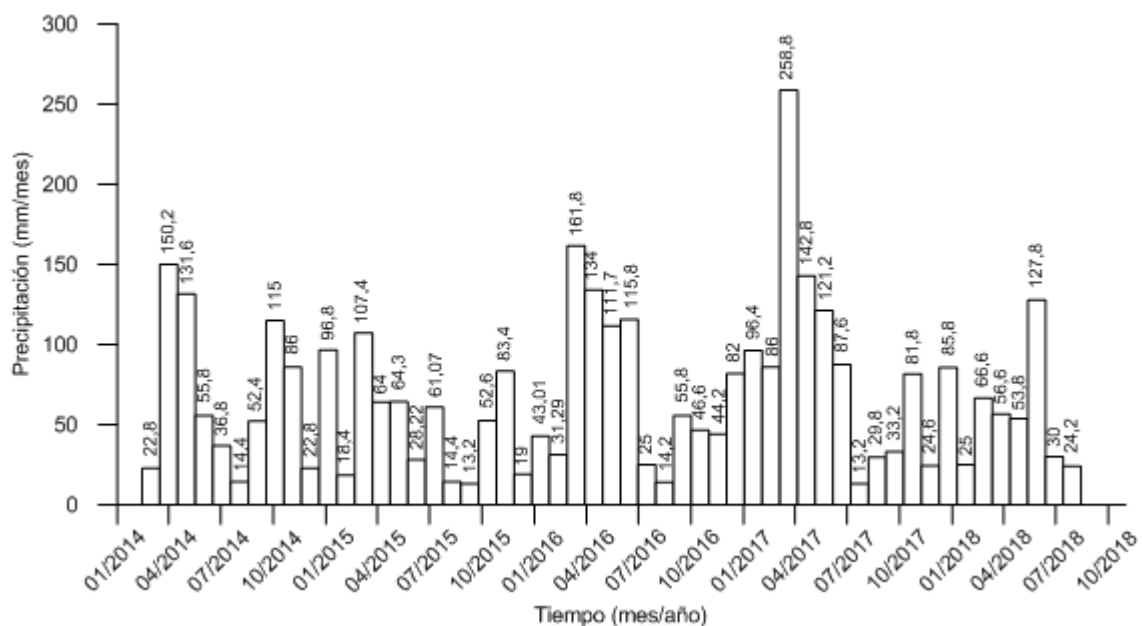


Figura 7. Precipitación mensual.

Fuente: Autor (2019)

### 3.4 Generar escenarios de captación, uso de agua lluvia con base en la realidad de los hogares de la ciudad y definir las constantes del sistema hidrológico

Se generaron distintos escenarios de captación (área de captación del techo y volumen del tanque de almacenamiento) y uso de agua lluvia (demanda), basados en las realidades más comunes de los hogares de la ciudad. El estudio consideró 3 áreas de captación, más comunes en la ciudad de Cuenca, y 3 tanques de almacenamiento con volúmenes comerciales. Además, fue necesario determinar las constantes del sistema hidrológico.

#### 3.4.1. Escenarios

**Área de captación:** Se basó en el estudio realizado por Godoy (2015), el cual manifiesta que el área promedio de tejados en un bloque de la ciudad es de Cuenca es de 82.51 m<sup>2</sup>. Con base en esto se crearon 3 áreas de captación de 60 m<sup>2</sup>, 80 m<sup>2</sup> y 100 m<sup>2</sup>.

**Demanda:** En función del número de habitantes de la familia, del uso de agua lluvia y del consumo de agua per cápita al día. Para obtener la familia común de la ciudad de Cuenca, se basó en el estudio realizado por Godoy (2015), el cual manifiesta que el número de habitantes promedio de un hogar cuencano es de 4 personas. El uso de agua lluvia consideró las actividades que no requieran agua potable, por ello se decidió ocupar el agua lluvia en los sanitarios y la limpieza del hogar. Para obtener el

porcentaje de reparto del gasto de agua en dichas actividades se acudió a citas bibliográficas en las cuales se determinó que los sanitarios representan al 21 % y la limpieza el 7 %; por lo que el total del uso de agua lluvia para el hogar fue del 28 % (Fundación AQUAE, s. f.)

El valor de la demanda se calculó a partir del consumo por habitante al día de 194.27 lt calculado en el artículo “Consumo sustentable de agua en viviendas de la ciudad de Cuenca” con datos de ETAPA del año 2017 (Molina, Quesada, Calle, Ortiz, & Orellana, 2018). Este valor se multiplicó por el porcentaje de uso de agua lluvia en el hogar (28 %) y por el número habitantes de la familia (4). Por lo que se obtuvo un valor aproximado de 218 lt diarios.

**Tanque de almacenamiento:** Se establecieron 3 tamaños comerciales de tanques comunes para que el usuario final pueda decidir cuál es el más conveniente. Los tamaños fueron 500 lt, 1000 lt y 2500 lt.

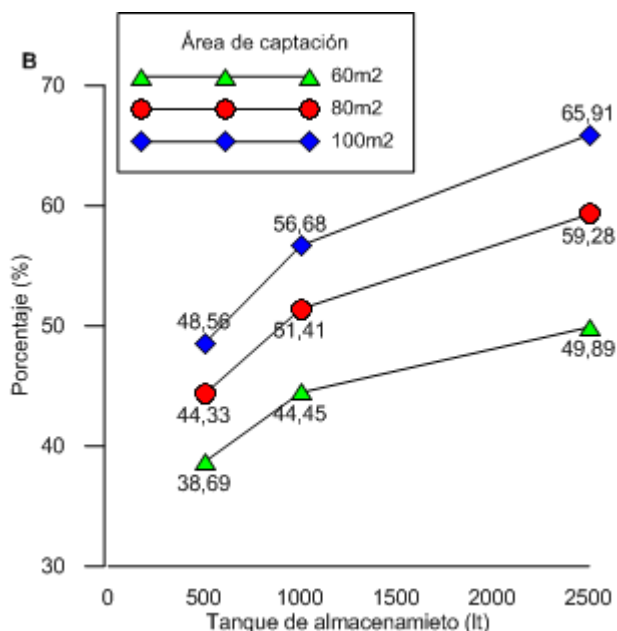
### 3.4.2. Constantes del sistema hidrológico

**Eficiencia:** Se consideró un coeficiente de efectividad del sistema de 0.95 debido a las pérdidas por eficiencia. El sistema comúnmente pierde agua en su transporte hasta el tanque de almacenamiento.

**Escorrentía:** Se determinó un coeficiente de escorrentía de 0.9 porque el tejado más común en la ciudad de Cuenca es la teja, según el estudio de Godoy (2015); el cual pierde agua por evaporación, absorción y salpicadura al momento del impacto de la lluvia.

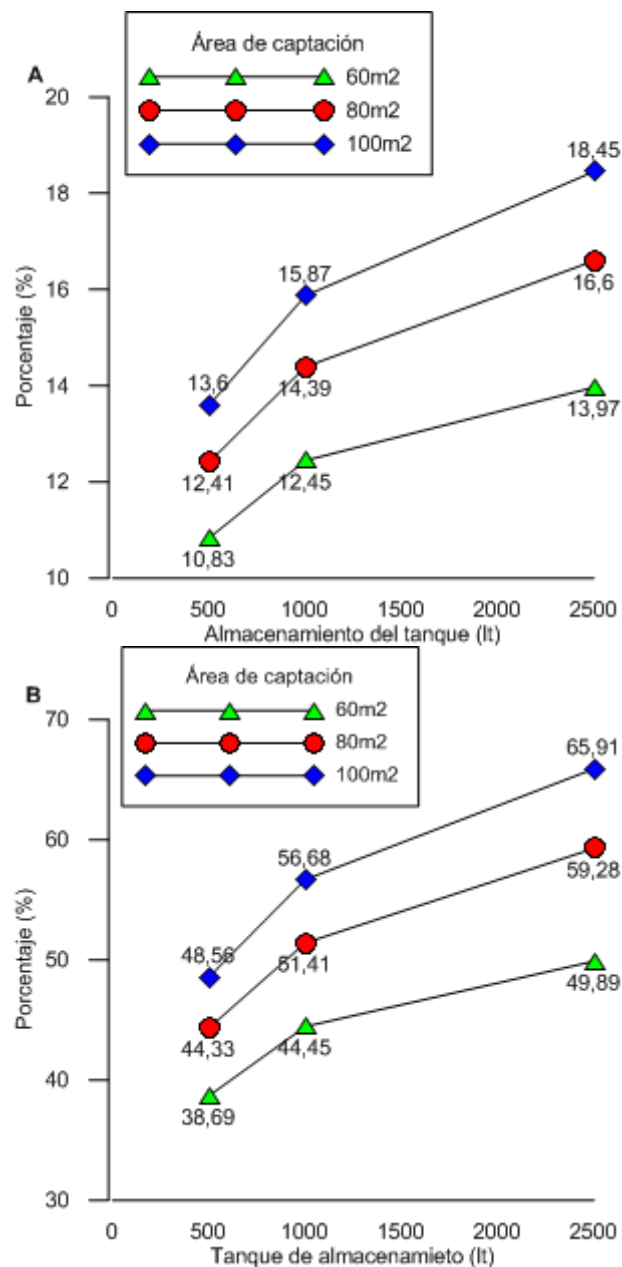
### 3.5 Evaluación del funcionamiento del sistema de cosecha de agua lluvia.

#### 3.5.1 Ahorro de agua potable y eficiencia de satisfacción de la demanda



En la

Figura 8, el gráfico A representa al porcentaje de ahorro de agua potable y el B la eficiencia de la satisfacción de la demanda, se observaron resultados similares, demostrando que el tanque de mayor almacenamiento siempre tuvo el mejor resultado en los índices. Además, a mayor área de captación el aumentar el tamaño del tanque de almacenamiento tiene un mayor incremento en el porcentaje de ahorro de agua y eficiencia de satisfacción de la demanda, mientras que en la menor área de captación el incremento de los porcentajes al aumentar el tamaño del tanque de almacenamiento no es mayor.



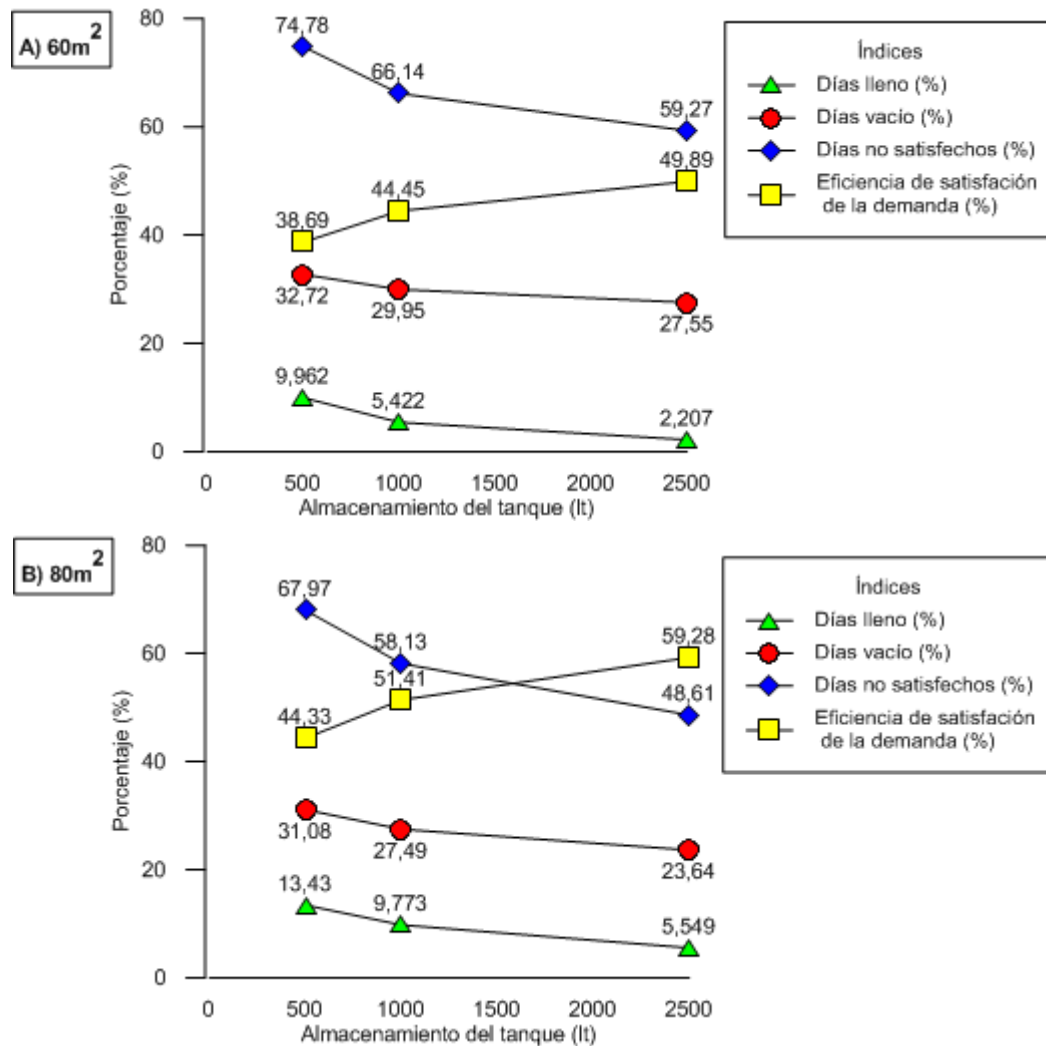
**Figura 8.** A) Ahorro de agua potable y (B) eficiencia de satisfacción de la demanda, expresado en porcentaje para los tres tanques de almacenamiento y las tres áreas de captación.

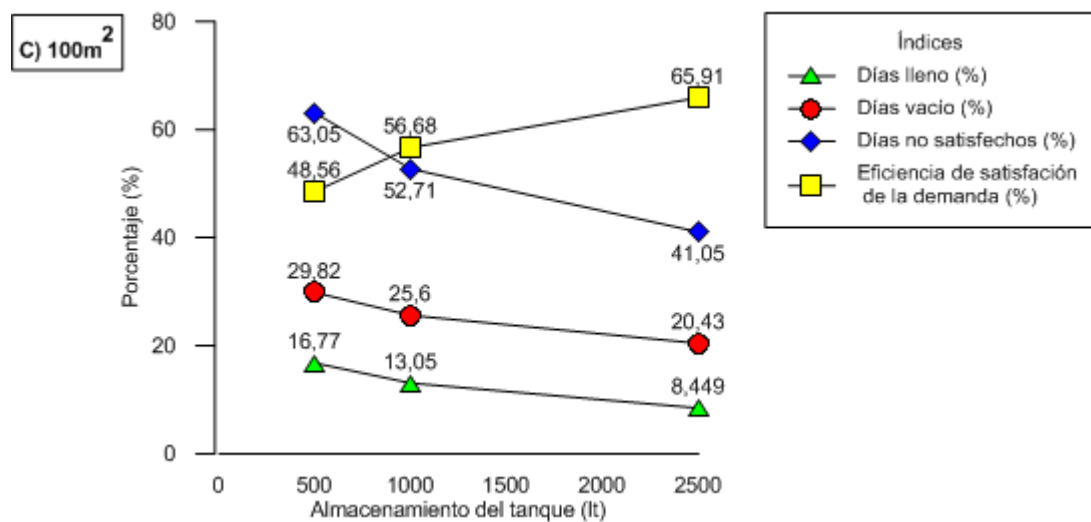
**Fuente:** Autor (2019).

### 3.5.2 Dinámica del almacenamiento

En la Figura 9, se representa la dinámica de almacenamiento para los diferentes escenarios, en los 3 gráficos A) 60 m<sup>2</sup>, B) 80 m<sup>2</sup> y C) 100 m<sup>2</sup> el tanque de mayor capacidad de almacenamiento tuvo el menor porcentaje de días lleno, días vacío y días que no satisfizo la demanda, lo cual es inverso a la eficiencia de la satisfacción de la demanda. En los 3 gráficos se puede observar que al aumentar el tamaño del tanque disminuyó, en gran proporción, el porcentaje de los días que no se satisface la

demanda, pero el porcentaje de días con el tanque lleno y con el tanque vacío no tiene gran variación. Los porcentajes de los índices, al aumentar el tamaño del tanque de almacenamiento en el área de captación más grande, tuvo una mayor diferencia entre ellos mostrando un mayor impacto en comparación con las áreas de captación menores. La tabla de la dinámica del almacenamiento puede apreciarse en el Anexo 2.



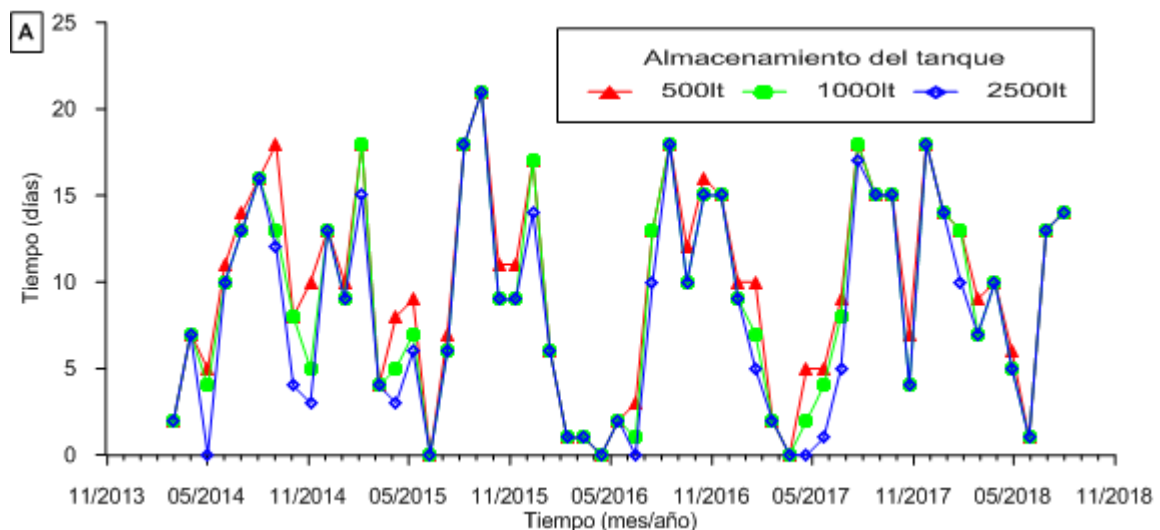


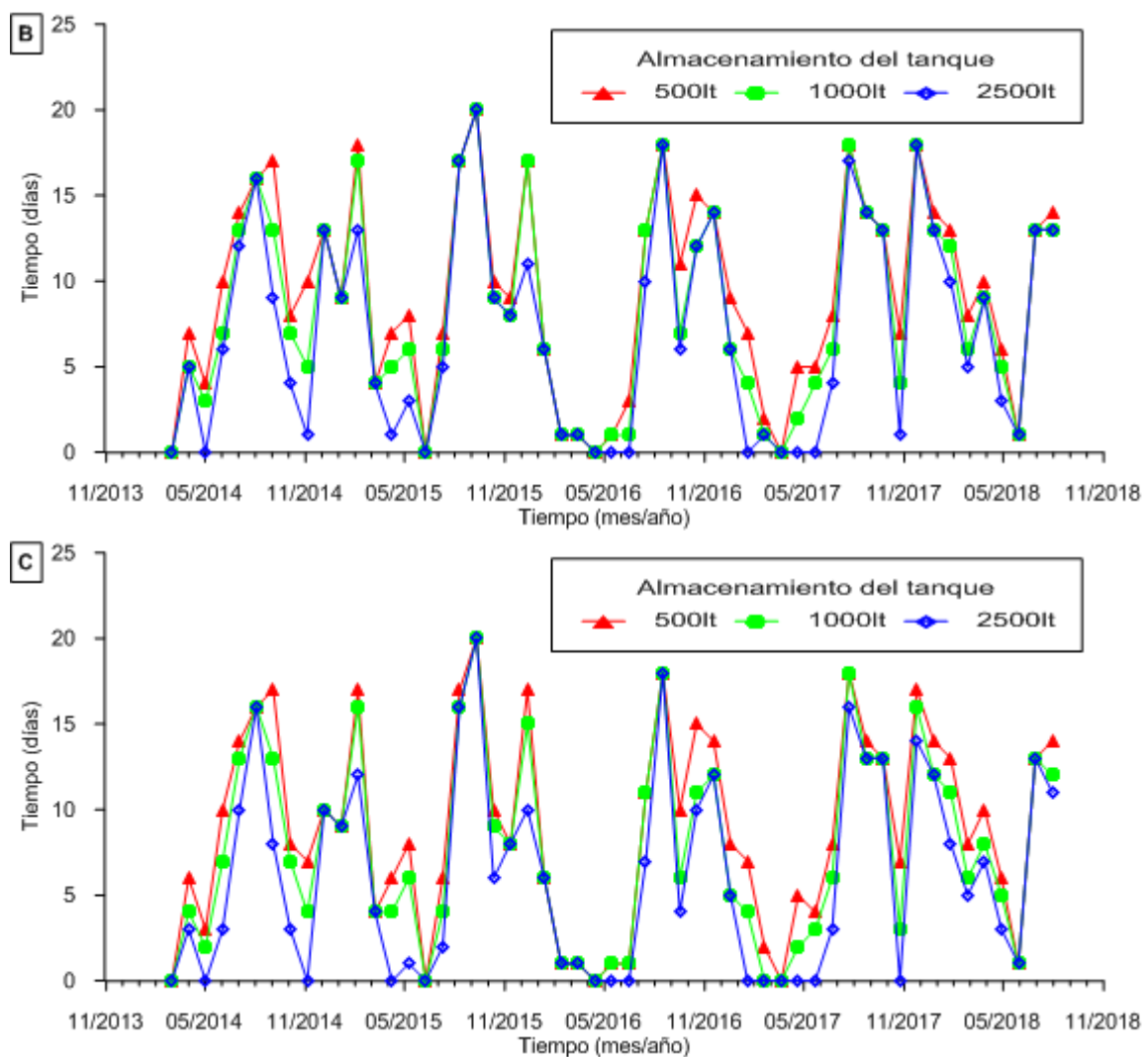
**Figura 9.** Dinámica del almacenamiento de los tanques de almacenamiento A) 60 m<sup>2</sup>, B) 80 m<sup>2</sup> y C) 100 m<sup>2</sup>.

Fuente: Autor (2019).

### 3.5.3 Días al mes con el tanque vacío

Los días al mes con el tanque vacío están representados en la Figura 10, en la que se observa que el tanque de mayor capacidad de almacenamiento fue el que normalmente tuvo menos días vacío. Se observa que en el techo de 60 m<sup>2</sup> la variación de los días con el tanque vacío fue mínima entre los diferentes tanques de almacenamiento, mientras que cuando aumentó el área de captación aumentó también la variación de días al mes con el tanque vacío. La tabla de los días al mes con el tanque vacío se detalla en el Anexo 3.

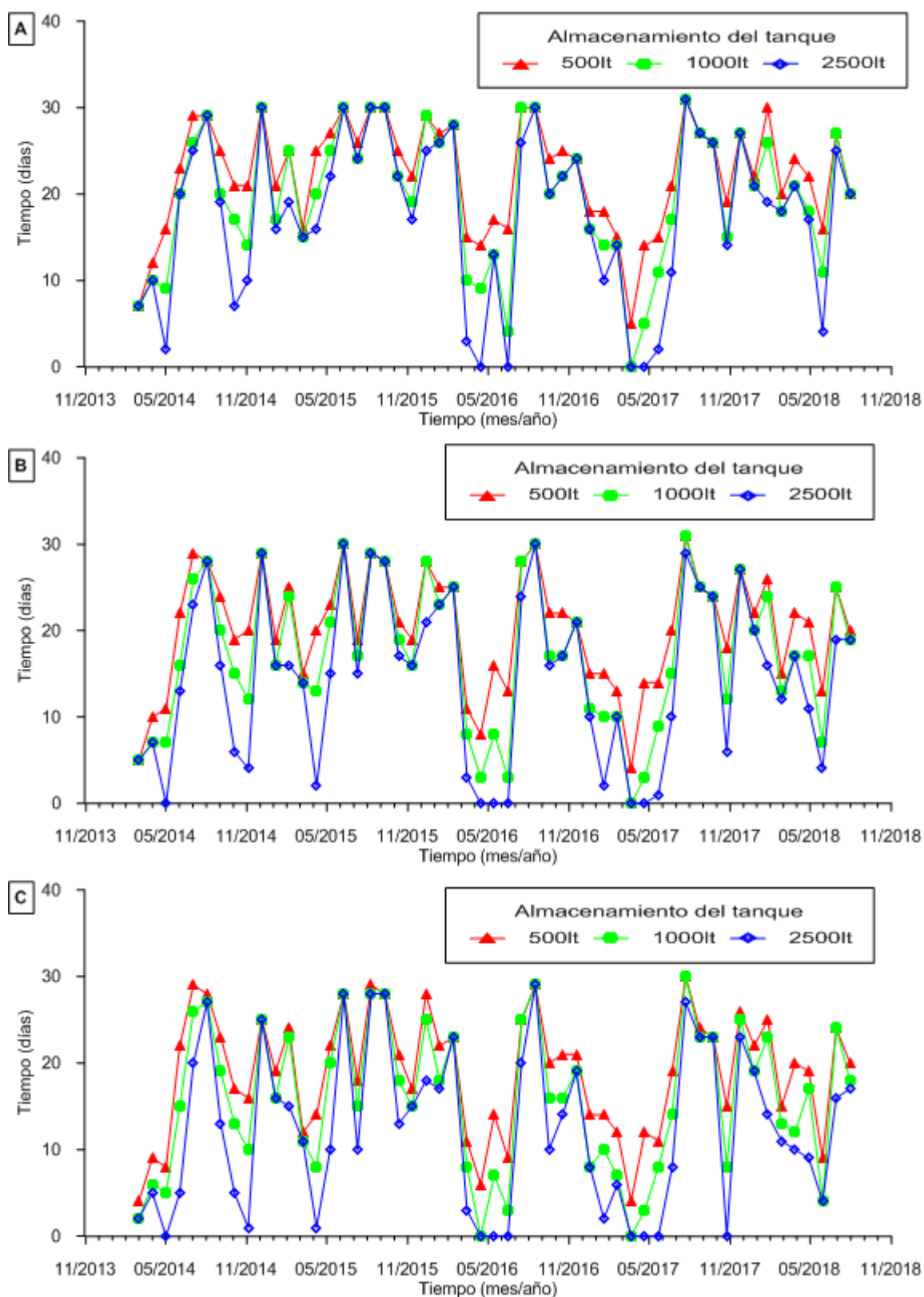




**Figura 10.** Días al mes que el tanque queda vacío a: A) 60 m<sup>2</sup>, B) 80 m<sup>2</sup> y C) 100 m<sup>2</sup> de captación.  
**Fuente:** Autor (2019).

### 3.5.4 Días al mes que no se cumple la demanda

Los días al mes en que no se cubre al 100 % la demanda, están representados en la Figura 11, en la cual el tanque de menor capacidad de almacenamiento fue el que tuvo un mayor número de días insatisfechos mensualmente, mientras que el tanque de mayor almacenamiento fue el que menos días no cumplió la demanda. Al aumentar el área de captación aumentó la diferencia de días no satisfechos entre los distintos tanques de almacenamiento. La tabla de los días al mes que no se cumple la demanda se encuentra en el Anexo 4.

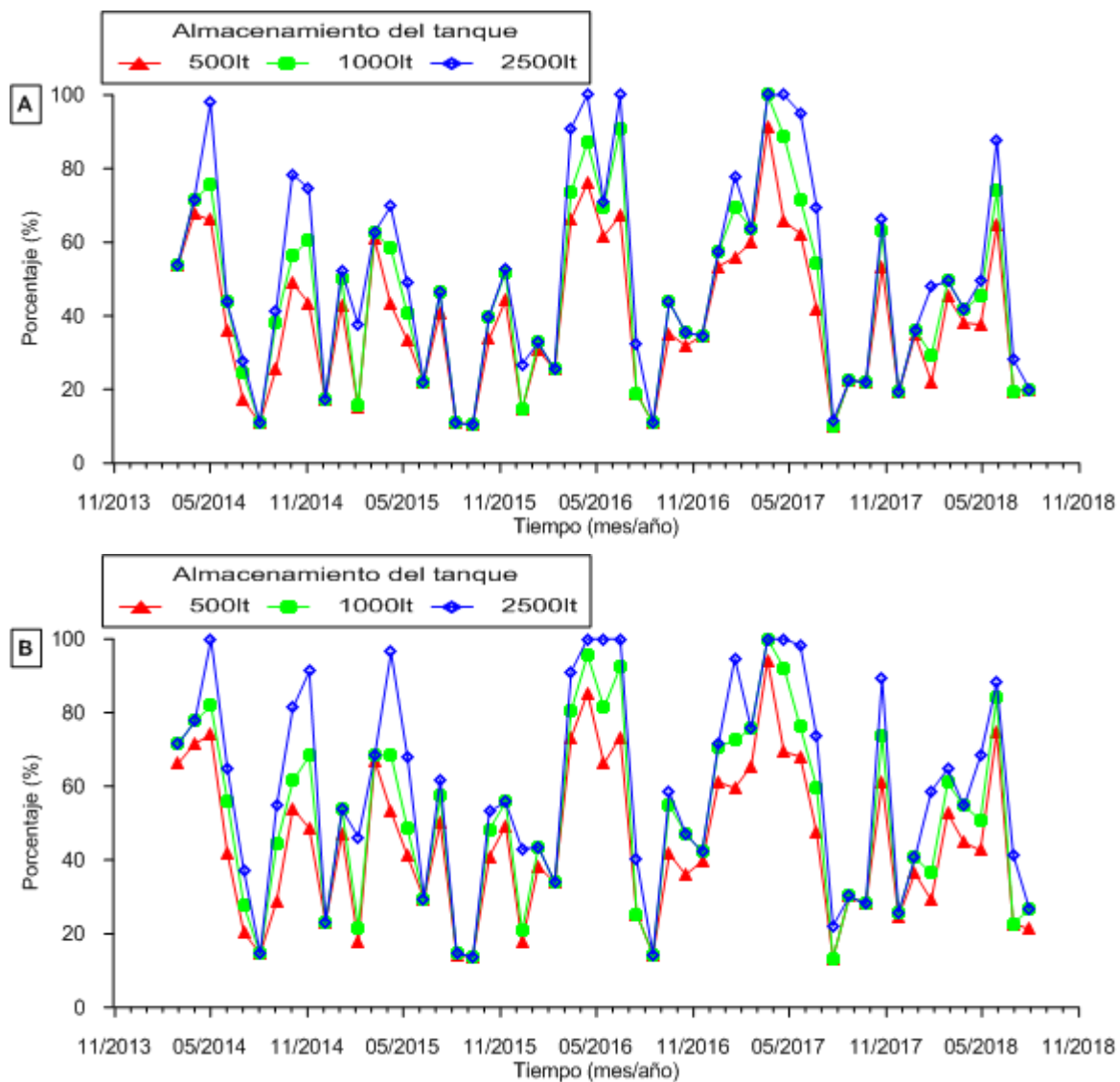


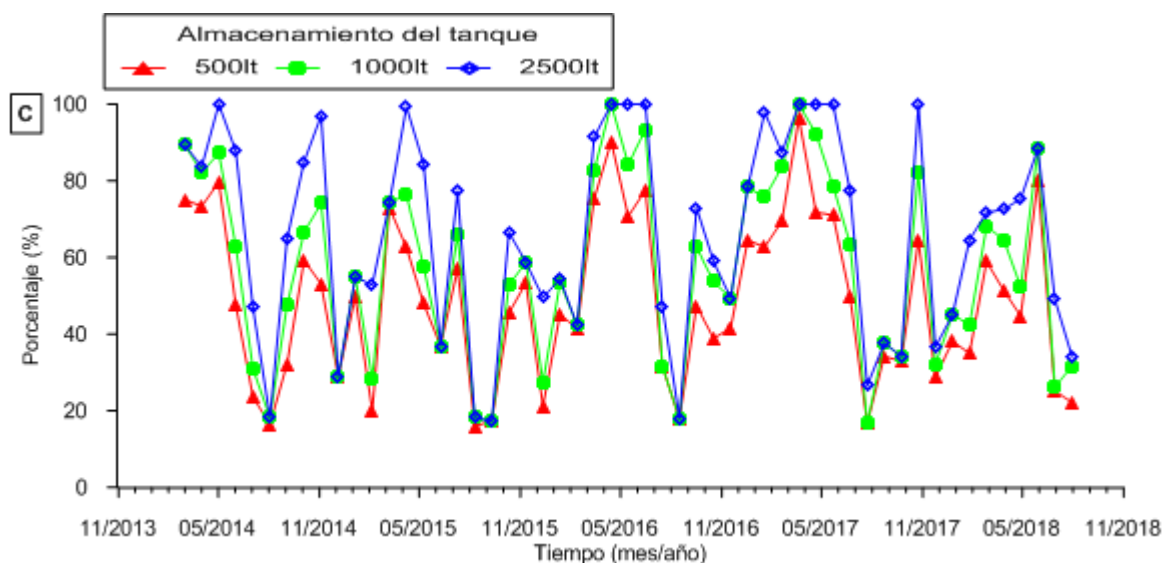
**Figura 11.** Días al mes que no se cubre el 100% de la demanda a: A) 60 m<sup>2</sup>, B) 80 m<sup>2</sup> y C) 100 m<sup>2</sup> de captación.

**Fuente:** Autor (2019)



### 3.5.5 Eficiencia promedio mensual





**Figura 12.** Eficiencia promedio mensual a A) 60 m<sup>2</sup>, B) 80 m<sup>2</sup> y C) 100 m<sup>2</sup> de captación.

Fuente: Autor (2019)

La eficiencia promedio mensual se representa en la Figura 12, en la que el tanque de mayor volumen fue el que mayor eficiencia tuvo. También se observa que el sistema funcionó mucho mejor en los meses lluviosos, marzo, abril, mayo, octubre y noviembre. Al aumentar el área de captación aumentó la diferencia de eficiencia entre los distintos tanques de almacenamiento. La tabla de la eficiencia promedio mensual se especifica en el Anexo 5.

### 3.6 Interpretación de los resultados de la evaluación del funcionamiento del sistema de cosecha de agua lluvia

El tanque de mayor capacidad de almacenamiento tuvo mejor resultado que los de menor capacidad, esto se reflejó en los 6 índices analizados. Al incrementar el tamaño del tanque de almacenamiento se mejoró el desempeño del sistema de captación de agua lluvia, pero la mejoría al aumentar el volumen del tanque de almacenamiento no fue lineal por lo que se podría sobredimensionar el tanque; por lo tanto, tener el tanque más grande no siempre es la mejor opción. Por ejemplo, en el caso de la eficiencia de satisfacción de la demanda para el área de captación de 60 m<sup>2</sup> el tanque de 500 lt (38.69 %) y el tanque de 1000 lt (44.45 %) tuvieron una variación de 5.76 % al aumentar 500 lt la capacidad del tanque de almacenamiento, mientras que, el tanque de 1000 lt (44.45 %) y el tanque de 2500 lt (49.89 %) tuvieron una variación del 5.44 % aumentando 1500 lt la capacidad de almacenamiento del tanque. Lo cual nos dice que no siempre será la mejor opción aumentar la capacidad de almacenamiento.

Para el área de captación de 60 m<sup>2</sup> los resultados no tuvieron una gran variación entre el tanque de 1000 lt y el de 2500 lt por lo que se recomienda, en estos casos, implementar el tanque de 1000 lt, ya que debido al aumento del área donde se implementará el tanque y la estructura que lo soporte, la diferencia en el precio de implementación será muy elevado. Con el tanque de 1000 lt se ahorraría el 12.45 % del agua potable consumida en el hogar, se tendría una eficiencia de satisfacción de la demanda de 44.45 %; 29.95 % de días el tanque vacío; 66.14 % de días en que no se cubriría el 100 % de la demanda; el máximo de días al mes con el tanque vacío sería de 21, el mínimo 0 y el promedio 8.96; el máximo de días al mes que no se cubriría la demanda al 100 % es 31, el mínimo 0 y el promedio 19.79; la eficiencia promedio máxima mensual es 100 % y la mínima 10.02 %.

Para las áreas de captación de 80 m<sup>2</sup> y 100 m<sup>2</sup> es ideal implementar el tanque de almacenamiento de 2500 lt, debido que los índices logran los mejores resultados con este tamaño de tanque y la mejora de resultados entre el tanque de 1000 lt y el de 2500 lt es representativa como para escoger el tanque más grande. Para el área de captación de 80 m<sup>2</sup> con el tanque de 2500 lt se ahorraría el 16.6 % del agua potable consumida en el hogar, se tendría una eficiencia de satisfacción de la demanda de 59.28 %; 23.64 % de días el tanque vacío; 48.61 % de días no se cubriría el 100 % de la demanda; el máximo de días al mes con el tanque vacío sería de 20, el mínimo 0 y el promedio 7.08; el máximo de días al mes que no se cubriría la demanda al 100 % es 30, el mínimo 0 y el promedio 14.55; la eficiencia promedio máxima mensual es 100 % y la mínima 13.81 %. Para el área de captación de 100 m<sup>2</sup> con el tanque de 2500 lt se ahorraría el 18.45 % del agua potable consumida en el hogar, se tendría una eficiencia de satisfacción de la demanda de 65.91 %; 20.43 % de días el tanque vacío; 41.05 % de días no se cubriría el 100 % de la demanda; el máximo de días al mes con el tanque vacío sería de 20, el mínimo 0 y el promedio 6.11; el máximo de días al mes que no se cubriría la demanda al 100 % es 29, el mínimo 0 y el promedio 12.28; la eficiencia promedio máxima mensual es 100 % y la mínima 17.26 %.

Cabe resaltar que los resultados varían mucho entre los meses lluviosos y los meses secos. El mes mas seco fue septiembre de 2015 cuando ocurrió el máximo número de días al mes con el tanque seco (21) y el número de días que no se cubrió la demanda al 100 % fue 30, obteniendo una eficiencia promedio mensual mínima de 10.35 %. Sin embargo, en promedio de los meses secos se podría tener agua en el tanque de almacenamiento durante más de la mitad del mes, lo cual es algo muy importante. Por



su parte, el mes con lluvias más constantes fue marzo de 2017 donde tuvimos los siguientes índices: 0 días con el tanque seco y 5 días que no se cubre la demanda al 100 %, así como la eficiencia promedio mensual máxima (91.15 %).

#### 4. Conclusiones

Es posible generar escenarios de captación y uso de agua lluvia, así como determinar las constantes del sistema hidrológico con base en las realidades más comunes de los hogares de la ciudad. Para generar estos escenarios y constantes es necesario basarse en investigaciones confiables o en el levantamiento de datos, que permitan que la información calculada en el modelo numérico sea fiable y se ajuste a la realidad local.

En este estudio se desarrolló un modelo numérico que simula el funcionamiento de un sistema de cosecha de agua lluvia, calculando las series de tiempo diarias del almacenamiento en el tanque y el desperdicio de agua lluvia. Este modelo proporcionó datos diarios de estas variables, que fueron utilizados para crear los índices con los que se evaluó la factibilidad de implementar la cosecha de agua lluvia en la ciudad de Cuenca.

El complejo desarrollo del modelo numérico considera todas las variables, constantes, condiciones y cálculos y así evitar cualquier tipo de error en el momento de ejecutarlo o que se generen datos falsos. Es replicable en cualquier lugar en donde se busque obtener series de tiempo diarias del almacenamiento en el tanque y el desperdicio de agua lluvia, a pesar de que los datos de entrada, escenarios y constantes varíen en otros lugares.

Si bien los mejores resultados se obtuvieron con el tanque de almacenamiento más grande, no siempre será la mejor decisión porque el tanque podría estar sobredimensionado, por lo que es necesario interpretar en conjunto los resultados de todos índices. Los índices pueden ser replicados en cualquier lugar, en donde se considere que el ahorro de agua potable y eficiencia de satisfacción de la demanda, la dinámica del almacenamiento, los días al mes con el tanque vacío, los días al mes que no se cumple la demanda y la eficiencia promedio mensual, son los indicadores necesarios para evaluar la factibilidad de la cosecha de agua lluvia.

En conclusión, es factible cosechar agua lluvia en los tejados de la ciudad de Cuenca, en los cuales se podría ahorrar hasta un 18.45 % del agua potable consumida en el hogar, para tejados de 100 m<sup>2</sup> con un tanque de 2500 lt de almacenamiento. Este ahorro es muy representativo para conservar las fuentes de agua de la ciudad y un apoyo muy valioso en la temporada seca para disminuir el consumo de agua potable.

## **5. Estudios futuros**

Se sugieren los siguientes estudios como continuación de la presente investigación:

- a) Realizar un análisis comparativo con datos de precipitación de otros pluviógrafos ubicados en la ciudad para identificar diferencias o similitudes en los resultados.
- b) Mejorar las estimaciones de las variables utilizadas en el estudio: uso de agua en usos diferentes al consumo humano, coeficiente de escorrentía del techo para diferentes tipos de superficies, eficiencia del sistema y área de captación de la vivienda.
- c) Planificar el uso del agua cosechada en el tanque para situaciones de sequía.

## 6. Bibliografía

- Aladenola, O. O., & Adeboye, O. B. (2010). Assessing the Potential for Rainwater Harvesting. *Water Resources Management*, 24(10), 2129-2137.  
<https://doi.org/10.1007/s11269-009-9542-y>
- California Water Service. (2019). *Tarifas de agua I Distrito East de Los Ángeles*. Recuperado de <https://www.calwater.com/>
- Celleri, R., Willems, P., Buytaert, W., & Feyen, J. (2007). Space–time rainfall variability in the Paute basin, Ecuadorian Andes. *Hydrological Processes*, 21(24), 3316-3327. <https://doi.org/10.1002/hyp.6575>
- El Telégrafo. (2012, agosto 28). *El desperdicio de agua en Cuenca llega al 60%*. Recuperado de <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/regional/1/el-desperdicio-de-agua-en-cuenca-llega-al-60>
- EPMAPS. (s. f.). Captación. Recuperado 25 de septiembre de 2018, de Bienvenido a EPMAPS website: <https://www.aguaquito.gob.ec/captacion/>
- ETAPA - EP. (2019). Servicios de Telefonía, Televisión, Internet, Agua Potable, Alcantarillado de Cuenca - Ecuador. Recuperado 22 de abril de 2019, de <https://www.etapa.net.ec/Principal/Agua-potable/Operación-y-Mantenimiento/Tarifas>
- FAO. (2000). *Manual de captación y aprovechamiento del agua de lluvia*. Santiago, Chile: Oficina Regional de la FAO para America Latina y el Caribe.
- FAO. (2013). *Captación y almacenamiento de agua de lluvia Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe*. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/019/i3247s/i3247s.pdf>
- FAO. (2016). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recuperado 17 de mayo de 2019, de AQUASTAT website: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/didyouknow/indexesp.stm>
- Fundación AQUAE. (s. f.). ¿Cómo se reparte el gasto del agua en un hogar? Recuperado 20 de mayo de 2019, de Fundación Aquae website: <https://www.fundacionaquae.org/wiki-aquae/sabias-que/como-se-reparte-el-gasto-del-agua-en-un-hogar/>
-

- Godoy, J. D. (2015). *Urban water: harvesting rainwater at household level to improve the current water metabolism in Cuenca, Ecuador*. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/79256>
- Helmreich, B., & Horn, H. (2009). Opportunities in rainwater harvesting. *Desalination*, 248(1), 118-124. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.046>
- Howard, G., & Bartram, J. (2003). *Domestic water quantity, service level and health*. Recuperado de <https://apps.who.int/iris/handle/10665/67884>
- Molina, E., Quesada, F., Calle, A., Ortiz, J., & Orellana, D. (2018). *Consumo sustentable de agua en viviendas de la ciudad de Cuenca*. <https://doi.org/10.17163/ings.n20.2018.03>
- PNUD. (2016). *Captación y aprovechamiento de agua de lluvia en america latina, experiencias y conclusiones de un debate*. Chile.
- Rojas, M. N., Gallardo, J. R., & Martínez, A. (2012). Implementación y caracterización de un sistema de captación y aprovechamiento de agua de lluvia. *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 15(1), 16-23.
- Solís M., L. (2009). La escasez, el costo y el precio del agua en México. *Economía, UNAM*, 2(006). Recuperado de <http://www.revistas.unam.mx/index.php/ecu/article/view/2846>
- Sucozhañay, A. (2015). *Análisis de la variabilidad espacio temporal de la precipitación en la ciudad de Cuenca durante el período febrero – julio de 2014*. Recuperado de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/21687>
- Tobón, C. (2009). *Los bosques andinos y el agua*. Programa Regional ECOBONA-Intercooperation.



## 7. Anexos

### Anexo 1: Script de R-Studio para la cosecha de agua lluvia.

```
setwd("C:/Users/mario/Desktop/David/tesis/Resultados")
COSECHA <- function(input = "inputESTEBAN.csv",      #tabla de entrada en formato
.csv
                        e = 0.9,      #Escorrentía
                        A = 100,      #techo m2
                        Eff = 0.95,    #eficiencia inicial
                        VolMAX = 2500,#volumen del tanque lt
                        init.upper = 0, #volumen inicial en el tanque lt
                        D = 218       #demanda lt
)
##### finalizan argumentos de la funcion#####
{##### inicio cuerpo de la funcion#####
#~~~~~ lee archivo de entrada ~~~~~#
inp <- read.csv("inputESTEBAN.csv", na.strings="")      # archivo de entrada
a dataframe
inp[,1] <- as.Date(as.character(inp[,1]),format="%d/%m/%Y")
#inp <- read.csv("inputESTEBAN.csv", na.strings="")
#inp[,1]<-as.Date(as.character(inp[,1]))
#q<-inp[,1]
names(inp) <- c("date","P")      # cambia nombre de columnas
attach(inp, warn.conflicts = F)   # pone disponibles los valores del
dataframe
#~~~~~ crea vectores en las columnas ~~~~~#
nrun <- nrow(inp) #corridas por el n[mero de filas
## llenar variables con valores
Pef <- rep(NA,nrun)              # vol input
STO <- rep(NA,nrun)              #almacenamiento
Wasted <- rep(NA,nrun)          # desperdicio
E2 <- rep(NA,nrun)              #eficiencia del sistema funcionando
AguaC <- rep(NA,nrun)           #Agua Consumida
Dias_no_satisfechos <- rep(NA,nrun) #Dias no satisfechos
#~~~~~ calculate iterative dependent time series
~~~~~#
for (i in 1:nrun) {              # itera calculos en las filas
#~~~~~
~~~~~#
  Pef[i] <- (P[i] * e * A * Eff)  ## iniciacion de entrada
  if (i==1) {                    # conditional: rellena el almacenamiento con volumenes
iniciales
    STO[i] <- init.upper
  }
  else {                          # ... or i-1 storage fillings llenamos vlores con los almacenamientos
anteriores =)
```

```
    STO[i] <- STO[i-1]
  }
  STO[i] <- STO[i] + Pef[i]      # almacenamiento mas precipitacion
  if (STO[i] > VolMAX) {
# cuando es mayor al volumen del tanque directamente asigno el volumen del tanque
    Wasted[i] <- STO[i] - VolMAX #calculo un desperdicio
    STO[i] <- VolMAX
  }
  else {
    Wasted[i] <- 0
  }
  if (STO[i] < 0) {
# cuando es negativo el almacenamiento necesito poner 0 para que calcule
# adecuadamente la eficiencia E2
    STO[i] <- 0
  }
  E2[i] <- ( STO[i] / D ) * 100
# se podria incluir el desperdicio por ahora solo se basa en el agua captada
  if (E2 [i] >100) {
    E2[i] <- 100
  }
  AguaC[i] <- (D * E2[i])/100 #agua consumida
  STO[i] <- STO[i] - D
  if (STO[i] < 0) {
    Dias_no_satisfechos[i] <- 1
  }
  else {
    Dias_no_satisfechos[i] <- 0
  }
  if (STO[i] < 0) {
# cuando es negativo el almacenamiento necesito poner 0 para que calcule
# adecuadamente la eficiencia E2e
    STO[i] <- 0
  }
}
return (data.frame(date, P, Pef, D, STO, E2, Wasted, AguaC, Dias_no_satisfechos))
# regresa valores
}
write.csv(COSECHA(), "datos.csv", row.names = FALSE, na="0")
df= data.frame(COSECHA())
Eficiencia<- mean(df$E2)
Precipitacion_efectiva_total<- sum(df$Pef)
Agua_consumida_total <- sum(df$AguaC)
Desperdicio_total <- sum(df$Wasted)
Porcent_de_Pef_usada<- (sum(df$AguaC)/sum(df$Pef))*100
Total_dias_no_satisfechos<- sum(df$Dias_no_satisfechos)
```



```
Porcent_Ahorro_de_agua_potable <-((0.28*(mean(df$E2))))  
Resumen1<-  
data.frame(Eficiencia,Precipitacion_efectiva_total,Agua_consumida_total,Desperdicio_  
total,Porcent_de_Pef_usada,  
Total_dias_no_satisfechos,Porcent_Ahorro_de_agua_potable)  
write.csv(Resumen1, "resultados.csv", row.names = FALSE,na="0")  
(COSECHA())  
Resumen1
```

---

**Anexo 2: Dinámica del almacenamiento**

Área de Captación	A) 60 m <sup>2</sup>			B) 80 m <sup>2</sup>			C) 100 m <sup>2</sup>		
Tanque de Almacenamiento (lt)	500	1000	2500	500	1000	2500	500	1000	2500
Porcentaje de días lleno	9.96	5.42	2.21	13.43	9.77	5.55	16.77	13.05	8.45
Porcentaje de días vacío	32.72	29.95	27.55	31.08	27.49	23.64	29.82	25.60	20.43
Porcentaje de días no satisfechos	74.78	66.14	59.27	67.97	58.13	48.61	63.05	52.71	41.05
Porcentaje de eficiencia de satisfacción de la demanda	38.69	44.45	49.89	44.33	51.41	59.28	48.56	56.68	65.91

**Anexo 3: Días al mes con el tanque vacío**

Fecha	60 m <sup>2</sup>			80 m <sup>2</sup>			100 m <sup>2</sup>		
	Tanques (lt)			Tanques (lt)			Tanques (lt)		
	500	1000	2500	500	1000	2500	500	1000	2500
03/2014	2	2	2	0	0	0	0	0	0
04/2014	7	7	7	7	5	5	6	4	3
05/2014	5	4	0	4	3	0	3	2	0
06/2014	11	10	10	10	7	6	10	7	3
07/2014	14	13	13	14	13	12	14	13	10
08/2014	16	16	16	16	16	16	16	16	16
09/2014	18	13	12	17	13	9	17	13	8
10/2014	8	8	4	8	7	4	8	7	3
11/2014	10	5	3	10	5	1	7	4	0
12/2014	13	13	13	13	13	13	10	10	10
01/2015	10	9	9	9	9	9	9	9	9
02/2015	18	18	15	18	17	13	17	16	12
03/2015	4	4	4	4	4	4	4	4	4
04/2015	8	5	3	7	5	1	6	4	0
05/2015	9	7	6	8	6	3	8	6	1
06/2015	0	0	0	0	0	0	0	0	0
07/2015	7	6	6	7	6	5	6	4	2
08/2015	18	18	18	17	17	17	17	16	16
09/2015	21	21	21	20	20	20	20	20	20
10/2015	11	9	9	10	9	9	10	9	6
11/2015	11	9	9	9	8	8	8	8	8
12/2015	17	17	14	17	17	11	17	15	10
01/2016	6	6	6	6	6	6	6	6	6
02/2016	1	1	1	1	1	1	1	1	1
03/2016	1	1	1	1	1	1	1	1	1
04/2016	0	0	0	0	0	0	0	0	0
05/2016	2	2	2	1	1	0	1	1	0
06/2016	3	1	0	3	1	0	1	1	0
07/2016	13	13	10	13	13	10	11	11	7



<b>08/2016</b>	18	18	18	18	18	18	18	18	18
<b>09/2016</b>	12	10	10	11	7	6	10	6	4
<b>10/2016</b>	16	15	15	15	12	12	15	11	10
<b>11/2016</b>	15	15	15	14	14	14	14	12	12
<b>12/2016</b>	10	9	9	9	6	6	8	5	5
<b>01/2017</b>	10	7	5	7	4	0	7	4	0
<b>02/2017</b>	2	2	2	2	1	1	2	0	0
<b>03/2017</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>04/2017</b>	5	2	0	5	2	0	5	2	0
<b>05/2017</b>	5	4	1	5	4	0	4	3	0
<b>06/2017</b>	9	8	5	8	6	4	8	6	3
<b>07/2017</b>	18	18	17	18	18	17	18	18	16
<b>08/2017</b>	15	15	15	14	14	14	14	13	13
<b>09/2017</b>	15	15	15	13	13	13	13	13	13
<b>10/2017</b>	7	4	4	7	4	1	7	3	0
<b>11/2017</b>	18	18	18	18	18	18	17	16	14
<b>12/2017</b>	14	14	14	14	13	13	14	12	12
<b>01/2018</b>	13	13	10	13	12	10	13	11	8
<b>02/2018</b>	9	7	7	8	6	5	8	6	5
<b>03/2018</b>	10	10	10	10	9	9	10	8	7
<b>04/2018</b>	6	5	5	6	5	3	6	5	3
<b>05/2018</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>06/2018</b>	13	13	13	13	13	13	13	13	13
<b>07/2018</b>	14	14	14	14	13	13	14	12	11

**Anexo 4: Días al mes que no se cumple la demanda**

Fecha	60 m <sup>2</sup>			80 m <sup>2</sup>			100 m <sup>2</sup>		
	Tanques (lt)			Tanques (lt)			Tanques (lt)		
	500	1000	2500	500	1000	2500	500	1000	2500
03/2014	7	7	7	5	5	5	4	2	2
04/2014	12	10	10	10	7	7	9	6	5
05/2014	16	9	2	11	7	0	8	5	0
06/2014	23	20	20	22	16	13	22	15	5
07/2014	29	26	25	29	26	23	29	26	20
08/2014	29	29	29	28	28	28	28	27	27
09/2014	25	20	19	24	20	16	23	19	13
10/2014	21	17	7	19	15	6	17	13	5
11/2014	21	14	10	20	12	4	16	10	1
12/2014	30	30	30	29	29	29	25	25	25
01/2015	21	17	16	19	16	16	19	16	16
02/2015	25	25	19	25	24	16	24	23	15
03/2015	16	15	15	15	14	14	12	11	11
04/2015	25	20	16	20	13	2	14	8	1
05/2015	27	25	22	23	21	15	22	20	10
06/2015	30	30	30	30	30	30	28	28	28
07/2015	26	24	24	19	17	15	18	15	10
08/2015	30	30	30	29	29	29	29	28	28
09/2015	30	30	30	28	28	28	28	28	28
10/2015	25	22	22	21	19	17	21	18	13
11/2015	22	19	17	19	16	16	17	15	15
12/2015	29	29	25	28	28	21	28	25	18
01/2016	27	26	26	25	23	23	22	18	17
02/2016	28	28	28	25	25	25	23	23	23
03/2016	15	10	3	11	8	3	11	8	3
04/2016	14	9	0	8	3	0	6	0	0
05/2016	17	13	13	16	8	0	14	7	0
06/2016	16	4	0	13	3	0	9	3	0
07/2016	30	30	26	28	28	24	25	25	20



<b>08/2016</b>	30	30	30	30	30	30	29	29	29
<b>09/2016</b>	24	20	20	22	17	16	20	16	10
<b>10/2016</b>	25	22	22	22	17	17	21	16	14
<b>11/2016</b>	24	24	24	21	21	21	21	19	19
<b>12/2016</b>	18	16	16	15	11	10	14	8	8
<b>01/2017</b>	18	14	10	15	10	2	14	10	2
<b>02/2017</b>	15	14	14	13	10	10	12	7	6
<b>03/2017</b>	5	0	0	4	0	0	4	0	0
<b>04/2017</b>	14	5	0	14	3	0	12	3	0
<b>05/2017</b>	15	11	2	14	9	1	11	8	0
<b>06/2017</b>	21	17	11	20	15	10	19	14	8
<b>07/2017</b>	31	31	31	31	31	29	30	30	27
<b>08/2017</b>	27	27	27	25	25	25	24	23	23
<b>09/2017</b>	26	26	26	24	24	24	23	23	23
<b>10/2017</b>	19	15	14	18	12	6	15	8	0
<b>11/2017</b>	27	27	27	27	27	27	26	25	23
<b>12/2017</b>	22	21	21	22	20	20	22	19	19
<b>01/2018</b>	30	26	19	26	24	16	25	23	14
<b>02/2018</b>	20	18	18	15	13	12	15	13	11
<b>03/2018</b>	24	21	21	22	17	17	20	12	10
<b>04/2018</b>	22	18	17	21	17	11	19	17	9
<b>05/2018</b>	16	11	4	13	7	4	9	4	4
<b>06/2018</b>	27	27	25	25	25	19	24	24	16
<b>07/2018</b>	20	20	20	20	19	19	20	18	17



**Anexo 5: Eficiencia promedio mensual:**

Fecha	60 m <sup>2</sup>			80 m <sup>2</sup>			100 m <sup>2</sup>		
	Tanques (lt)			Tanques (lt)			Tanques (lt)		
	500	1000	2500	500	1000	2500	500	1000	2500
03/2014	53.65	53.65	53.65	66.23	71.54	71.54	75.10	89.42	89.42
04/2014	67.65	71.53	71.53	71.59	77.60	77.60	73.40	82.09	83.66
05/2014	66.03	75.64	97.83	73.98	81.82	100.00	79.69	87.29	100.00
06/2014	36.04	43.77	43.77	41.84	56.08	64.85	47.65	62.94	87.71
07/2014	17.12	24.51	27.93	20.35	27.75	37.25	23.59	30.99	47.00
08/2014	10.93	10.93	10.93	14.57	14.57	14.57	16.44	18.22	18.22
09/2014	25.49	38.20	41.10	28.89	44.18	54.80	32.15	47.44	64.78
10/2014	48.84	56.24	78.44	54.06	61.45	81.25	59.27	66.67	85.01
11/2014	43.49	60.75	74.56	48.57	68.30	91.24	53.07	74.05	96.99
12/2014	17.31	17.31	17.31	23.08	23.08	23.08	28.85	28.85	28.85
01/2015	42.88	50.28	52.33	47.19	53.65	53.65	49.78	54.97	54.97
02/2015	15.25	15.46	37.77	17.60	21.65	46.23	19.96	28.22	52.79
03/2015	60.95	62.62	62.62	66.97	68.44	68.44	72.99	74.26	74.26
04/2015	43.14	58.43	69.74	53.15	68.44	96.40	62.62	76.34	99.27
05/2015	33.48	40.87	48.81	41.09	48.49	67.94	47.96	57.63	84.50
06/2015	22.13	22.13	22.13	29.51	29.51	29.51	36.89	36.89	36.89
07/2015	40.89	46.36	46.36	49.95	57.35	61.81	57.08	66.06	77.27
08/2015	10.93	10.93	10.93	14.28	14.57	14.57	16.00	18.22	18.22
09/2015	10.35	10.35	10.35	13.81	13.81	13.81	17.26	17.26	17.26
10/2015	33.70	39.93	39.93	40.95	48.35	53.24	45.48	52.88	66.55
11/2015	44.12	51.76	52.59	49.39	55.67	55.67	53.40	58.76	58.76
12/2015	14.42	14.42	26.84	17.74	20.76	42.95	21.13	27.32	49.52
01/2016	30.62	32.65	32.65	38.36	43.53	43.53	45.25	53.50	54.41
02/2016	25.39	25.39	25.39	33.85	33.85	33.85	41.37	42.32	42.32
03/2016	66.14	73.69	90.93	73.25	80.65	91.13	75.22	82.62	91.33
04/2016	76.09	87.09	100.00	85.41	95.63	100.00	90.23	100.00	100.00
05/2016	61.65	69.66	70.76	66.20	81.37	100.00	70.74	84.31	100.00
06/2016	67.17	90.90	100.00	73.38	92.39	100.00	77.58	93.33	100.00
07/2016	18.98	18.98	32.37	25.30	25.30	40.13	31.63	31.63	47.37



<b>08/2016</b>	10.78	10.78	10.78	14.37	14.37	14.37	17.77	17.97	17.97
<b>09/2016</b>	35.21	43.77	43.77	41.63	55.02	58.36	47.39	62.68	72.95
<b>10/2016</b>	31.84	35.37	35.37	36.01	47.17	47.17	38.90	53.69	58.96
<b>11/2016</b>	34.67	34.67	34.67	39.70	42.20	42.20	41.63	49.42	49.42
<b>12/2016</b>	53.43	57.50	57.50	61.05	70.79	71.68	64.51	78.31	78.31
<b>01/2017</b>	55.86	69.26	77.92	59.55	72.51	94.70	62.74	75.65	97.84
<b>02/2017</b>	59.96	63.87	63.87	65.56	75.64	75.64	69.47	83.61	87.40
<b>03/2017</b>	91.15	100.00	100.00	94.27	100.00	100.00	96.39	100.00	100.00
<b>04/2017</b>	65.68	88.82	100.00	69.33	92.17	100.00	71.82	92.22	100.00
<b>05/2017</b>	62.35	71.65	95.10	68.08	76.14	98.34	71.03	78.68	100.00
<b>06/2017</b>	41.92	54.47	69.37	47.46	59.75	73.61	49.80	63.59	77.31
<b>07/2017</b>	10.02	10.02	11.62	13.36	13.36	22.14	16.70	16.70	26.50
<b>08/2017</b>	22.62	22.62	22.62	30.16	30.16	30.16	34.22	37.70	37.70
<b>09/2017</b>	21.85	21.85	21.85	28.02	28.02	28.02	32.94	34.19	34.19
<b>10/2017</b>	53.25	62.92	66.16	61.25	73.80	89.28	64.57	82.10	100.00
<b>11/2017</b>	19.30	19.30	19.30	24.59	25.73	25.73	28.82	32.16	36.60
<b>12/2017</b>	34.84	36.09	36.09	36.46	40.60	40.60	38.08	45.10	45.10
<b>01/2018</b>	22.05	29.45	48.02	29.08	36.48	58.68	35.04	42.44	64.64
<b>02/2018</b>	45.17	49.46	49.46	52.73	60.92	64.75	58.89	68.14	71.71
<b>03/2018</b>	38.06	41.79	41.79	44.74	54.64	54.64	51.42	64.64	72.56
<b>04/2018</b>	37.65	45.49	49.50	42.65	50.94	68.22	44.70	52.35	75.29
<b>05/2018</b>	64.63	73.89	87.86	74.59	84.03	88.11	80.07	88.36	88.36
<b>06/2018</b>	19.57	19.57	28.08	22.76	22.76	41.49	25.23	26.14	49.08
<b>07/2018</b>	20.00	20.00	20.00	21.29	26.67	26.67	22.14	31.70	34.24